

Usporedba robotiziranog WiseThin MAG postupka i robotiziranog konvencionalnog MAG postupka zavarivanja

Šutalo, Marin

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:564485>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-24**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marin Šutalo

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh, dipl. ing.

Student:

Marin Šutalo

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr.sc. Zoranu Kožuhu, dipl. ing. za pruženu podršku, pomoć i savjetima za pisanje diplomskog rada.

Zahvaljujem se asistentu Kristijanu Jurgecu, mag. ing. mech. na velikoj pomoći, strpljenju i stručnome vođenju te svim korisnim savjetima tijekom izrade diplomskoga rada.

Posebno se zahvaljujem obitelji, djevojci, prijateljima i kolegama na podršci i razumijevanju tijekom cjelokupnog studija.

Marin Šutalo



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marin Šutalo** JMBAG: 0035214850

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba robotiziranog WiseThin MAG postupka i robotiziranog konvencionalnog MAG postupka zavarivanja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparison of the robotic WiseThin MAG process and the robotic conventional MAG welding process**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu potrebno je proučiti i analizirati osnovne postavke robotiziranog MAG zavarivanja. Specificirati značajke robotske stanice i periferije u odnosu na izvore struje za zavarivanje i mogućnosti programiranja. Posebno analizirati svojstva WiseThin MAG postupka zavarivanja te obraditi, navesti i pojasniti glavne operativne prednosti navedenog postupka.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je konfigurirati robotsku stanicu za WiseThin MAG zavarivanje i na njoj za odabrani osnovni materijal provesti robotizirano zavarivanje konvencionalnim MAG i WiseThin MAG postupkom zavarivanja. Zavarivanje s oba postupka provesti na odgovarajućim konfiguracijama spoja te usporediti značajke konvencionalnog MAG i WiseThin MAG postupka. Zavarene uzorke ispitati sukladno zahtjevima norme HRN EN ISO 15614-1 i donijeti zaključke o dobivenim rezultatima i mogućoj aplikaciji WiseThin MAG postupka zavarivanja u proizvodnji.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

9. svibnja 2024.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Datum predaje rada:

11. srpnja 2024.

Predviđeni datumi obrane:

15. – 19. srpnja 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA	IX
POPIS OZNAKA	XI
POPIS KRATICA	XII
SAŽETAK	XIV
SUMMARY	XV
1. UVOD	1
2. MIG/MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA	2
2.1. Osnovni principi MIG/MAG zavarivanja	3
2.1.1. Električni luk	3
2.1.2. Napon električnog luka	5
2.1.3. Polaritet	6
2.1.4. Unos topline pri zavarivanju	7
2.1.5. Načini prijenosa dodatnog materijala	9
2.1.6. Položaj zavarivanja	13
2.1.7. Dodatni materijal	14
2.1.8. Zaštitni plinovi	16
2.1.9. Tehnika rada	18
2.2. Oprema za zavarivanje	19
2.2.1. Izvor struje za zavarivanje	20
2.2.2. Uređaj za dobavu žice	22
2.2.3. Pištolj za zavarivanje	23
2.3. Osnovni parametri MIG/MAG postupka zavarivanja	23

2.3.1.	Napon zavarivanja.....	24
2.3.2.	Struja zavarivanja.....	24
2.3.3.	Brzina dodavanja žice	24
2.3.4.	Brzina zavarivanja.....	26
3.	WISETHIN MODIFICIRANI MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA	27
3.1.	Opis postupka	27
4.	INDUSTRIJSKI ROBOTI.....	30
4.1.	Podjela industrijskih robota	32
4.1.1.	Vrste pogona zglobova.....	32
4.1.2.	Geometrija radnog prostora.....	32
4.1.3.	Načini upravljanja robotom.....	38
4.3.	Karakteristike robota	39
4.4.	Metode programiranja robota	41
4.4.1.	Online metode programiranja.....	41
4.4.2.	Offline metode programiranja.....	43
5.	EKSPERIMENTALNI POSTAV	44
5.1.	Konfiguracija robotske stanice	45
5.2.	FANUC ARC Mate 100iD	46
5.3.	Upravljačka jedinica R-30iB	49
5.4.	Izvor struje za zavarivanje Kemppi A7	50
5.5.	Hladnjak Kemppi A7.....	52
5.6.	Stanica za čišćenje pištolja za zavarivanje	53
5.7.	Pozicioner	53
6.	INTEGRACIJA ROBOTA I OPREME ZA ZAVARIVANJE	55

6.1.	Povezivanje fizičkih komponenti sustava.....	55
6.2.	Konfiguracija mrežne komunikacije	57
6.3.	Podешavanje sustava za rad.....	60
7.	EKSPERIMENTALNI RAD	61
7.1.	Osnovni materijal	61
7.2.	Dodatni materijal	62
7.3.	Zaštitna atmosfera.....	63
7.4.	Slobodni kraj žice	63
7.5.	Priprema uzoraka za zavarivanje	64
7.6.	Postupak zavarivanja kutnog spoja.....	65
7.7.	Ispitivanje penetrantima	70
7.8.	Makroizbrusci zavarenih uzoraka.....	73
7.9.	Analiza geometrije zavara	79
7.10.	Analiza rezultata	82
8.	ZAKLJUČAK	86
	LITERATURA.....	87

POPIS SLIKA

Slika 1. Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodnom žicom i zaštitnim plinom [2]	2
Slika 2. Ionizacija atoma plina u električnom luku [3]	4
Slika 3. Pad napona u električnom luku [4]	5
Slika 4. Smjer gibanja elektrona i intenzivnost zagrijavanja ovisno o vrsti i polaritetu struje: a) DCEN, b) DCEP, c) AC [6]	7
Slika 5. Prijenos dodatnog materijala kratkim spojem [7]	9
Slika 6. Prijenos materijala prijelaznim lukom [7]	10
Slika 7. Kritična struja prijelaza iz prijelaznog u štrcajući način prijenosa materijala [2]	11
Slika 8. Utjecaj elektromagnetske sile na otkidanje rastaljenih kapljica kod prijenosa štrcajućim lukom [8]	11
Slika 9. Prijenos metala štrcajućim lukom [7]	12
Slika 10. Karakteristika struje pulsirajućeg prijenosa metala [9]	12
Slika 11. Prijenos metala impulsnim lukom [7]	13
Slika 12. Položaji zavarivanja prema DIN EN ISO 6947 [11]	14
Slika 13. Utjecaj vrste zaštitnog plina na geometriju i oblik zavara [6]	16
Slika 14. Utjecaj tehnike rada na profil zavara. a) desna tehnika, b) neutralna tehnika, c) lijeva tehnika [6]	19
Slika 15. Komponente sustava za MIG/MAG zavarivanje [13]	19
Slika 16. Mehanizam unutarnje regulacije električnog luka kod izvora struje za zavarivanje s karakteristikom konstantnog napona [3]	20
Slika 17. Prikaz unutarnje regulacije visine električnog luka [5]	21
Slika 18. Shema sustava za dobavu žice kod MIG/MAG uređaja [15]	22
Slika 19. Dijelovi pištolja za MIG/MAG zavarivanje [16]	23

Slika 20. Ovisnost struje zavarivanja o brzini žice za različite promjere elektroda [2]	25
Slika 21. Povratni kabel za mjerenje napona kod zavarivanja WiseThin procesom [17]	28
Slika 22. Usporedba modificiranog MAG procesa WiseThin s konvencionalnim MAG prijenosom metala kratkim spojevima [17].....	28
Slika 23. Zona industrijskih robota [20].....	30
Slika 24. Količina instaliranih jedinica industrijskih robota u svijetu, u tisućama komada [21]	31
Slika 25. Kinematska struktura kartezijskog robota [23]	34
Slika 26. Primjer gantry robota [25].....	34
Slika 27. Kinematska struktura i radni prostor cilindričnog tipa robota [23]	35
Slika 28. Kinematska struktura i radni prostor sfernog tipa robota [23].....	36
Slika 29. Kinematska struktura i radni prostor SCARA robota [23]	36
Slika 30. Kinematska struktura i radni prostor artikuliranog tipa robota [23]	37
Slika 31. Razlika između preciznosti i ponovljivosti [24]	40
Slika 32. Privjesak za učenje ili „teach pendant“ [26]	42
Slika 33. Uređaj za snimanje putanje [27]	42
Slika 34. Program za simulaciju i programiranje robota ROBOGUIDE tvrtke FANUC [28].....	43
Slika 35. Primjer robotske stanice za zavarivanje [29]	44
Slika 36. 3D model robotske zavarivačke stanice	45
Slika 37. Robotska stanica u tvrtki Cromatec d.o.o.	46
Slika 38. ARC Mate 100iD robotska ruka tvrtke FANUC [30].....	46
Slika 39. Radni opseg ARC Mate 100iD robota [31]	47
Slika 40. R-30iB upravljačka jedinica s privjeskom za učenje [32]	49
Slika 41. Kemppi A7 izvor za zavarivanje [33]	50

Slika 42. Specifikacijska pločica Kemppi A7 MIG 450	51
Slika 43. Hladnjak Kemppi A7 [33].....	52
Slika 44. Podsustavi stanice za čišćenje [34]	53
Slika 45. Dvoosni pozicioner tvrtke FANUC [35].....	54
Slika 46. Dijagram povezivanja sustava [37].....	56
Slika 47. Dijagram spajanja sustava ethernet kablovima za komunikaciju [37].....	57
Slika 48. Podešavanje sklopa za komunikaciju u mrežnom korisničkom sučelju	58
Slika 49. Postavljanje IP adrese priključka 2 upravljačke jedinice.....	59
Slika 50. Postavke skenera za Ethernet/IP komunikaciju	59
Slika 51. Pravilno podešeni postupci za zavarivanje na upravljačkoj jedinici robota	60
Slika 52. Izjava o svojstvima korištene žice [39].....	62
Slika 53. Spremnik zaštitnog plina Ferroline C18	63
Slika 54. Mjerenje duljine slobodnog kraja žice	63
Slika 55. Pripajanje testnih ploča u napravi za pripajanje.....	64
Slika 56. Stezanje testnih uzoraka na pozicioner robota.....	64
Slika 57. Uzorak u PA položaju zavarivanja.....	65
Slika 58. Položaj pištolja za zavarivanje – lijeva tehnika rada	66
Slika 58. Zavareni uzorak 1.....	67
Slika 59. Zavareni uzorak 2.....	67
Slika 60. Zavareni uzorak 3.....	68
Slika 61. Zavareni uzorak 4.....	68
Slika 62. Zavareni uzorak 5.....	69
Slika 63. Zavareni uzorak 6.....	69

Slika 64. Nanošenje penetranata na površinu zavara	70
Slika 65. Nanošenje razvijaača na površinu zavara	71
Slika 66. Pregled indikacija pukotina na uzorku 1	71
Slika 67. Pregled indikacija pukotina na uzorku 2	71
Slika 68. Pregled indikacija pukotina na uzorku 3	72
Slika 69. Pregled indikacija pukotina na uzorku 4	72
Slika 70. Pregled indikacija pukotina na uzorku 5	72
Slika 71. Pregled indikacija pukotina na uzorku 6	72
Slika 72. Indikacije diskontinuiteta na uzorku 3	73
Slika 73. Rezanje makroizbrusaka na tračnoj pili	73
Slika 74. Tračna brusilica	74
Slika 75. Uređaj za fino brušenje i poliranje Mecatech 250	74
Slika 76. Tri postotna otopina nitala za nagrizanje uzoraka	75
Slika 77. Digitalni mikroskop Insize	75
Slika 78. Makroizbrusak uzorka 1	76
Slika 79. Makroizbrusak uzorka 2	76
Slika 80. Makroizbrusak uzorka 3	77
Slika 81. Makroizbrusak uzorka 4	77
Slika 82. Makroizbrusak uzorka 5	78
Slika 83. Makroizbrusak uzorka 6	78
Slika 84. Dijagram usporedbe dubine penetracije i dubine prosječne bočne penetracije uzoraka 1 i 2	82
Slika 85. Dijagram usporedbe brzine zavarivanja uzoraka 1 i 2	82

Slika 86. Dijagram usporedbe dubine penetracije i dubine prosječne bočne penetracije uzoraka 3 i 4	83
Slika 87. Dijagram usporedbe brzine zavarivanja uzoraka 3 i 4	83
Slika 88. Dijagram usporedbe dubine penetracije i dubine prosječne bočne penetracije uzoraka 5 i 6	84
Slika 89. Dijagram usporedbe brzine zavarivanja uzoraka 5 i 6	84

POPIS TABLICA

Tablica 1. Koeficijent iskoristivosti topline električnog luka za određene postupke zavarivanja [6] .	8
Tablica 2. Značenje oznake žice G 42 4 M21 3Si1 prema EN ISO 14341 [13]	15
Tablica 3. Svojstva tipičnih zaštitnih plinova pri MIG/MAG zavarivanju [6]	17
Tablica 4. Usporedba tijeka procesa WiseThin i konvencionalnog MAG postupka [17].....	29
Tablica 5. Tipovi zglobova industrijskih robota [22].....	33
Tablica 6. Geometrija radnog prostora robota prema glavnim osima [22]	33
Tablica 7. Načini upravljanja robota i njihove primjene [22]	38
Tablica 8. Karakteristike robota [23]	39
Tablica 9. Tehničke karakteristike robota FANUC ArcMate 100iD [31].....	48
Tablica 10. Tehničke karakteristike izvora struje za zavarivanje Kemppi A7 [33].....	51
Tablica 11. Tehničke karakteristike dvoosnog pozicionera tvrtke FANUC [36]	54
Tablica 12. Postavke IP adresa komponenti za postavke mreže.	58
Tablica 13. Mehanička svojstva materijala S235JR za debljine do 16 mm prema standardu EN 10025-2 [38]	61
Tablica 14. Kemijski sastav materijala S235JR za debljine do 16 mm prema standardu EN 10025-2 [38]	62
Tablica 15. Parametri zavarivanja eksperimentalnog rada.....	66
Tablica 16. Makroizbrusci uzoraka 1 i 2 s karakterističnim dimenzijama zavara	79
Tablica 17. Geometrija zavarenih spojeva uzoraka 1 i 2	79
Tablica 18. Makroizbrusci uzoraka 3 i 4 s karakterističnim dimenzijama zavara	80
Tablica 19. Geometrija zavarenih spojeva uzoraka 3 i 4	80
Tablica 20. Makroizbrusci uzoraka 5 i 6 s karakterističnim dimenzijama zavara	81

Tablica 21. Geometrija zavarenih spojeva uzoraka 5 i 6 81

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
A_5	%	Istezljivost
B	mm/s	Brzina taljenja elektrode
HB	-	Tvrdoća po Brinell-u
I	A	Jakost struje zavarivanja
k	-	Koeficijent iskoristivosti topline električnog luka
L	mm	Duljina luka
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja
U	V	Napon zavarivanja
v	cm/min	Brzina zavarivanja
Q	kJ/mm	Unos topline

POPIS KRATICA

Kratika	Značenje
AC	<i>Alternating Current</i> – izmjenična struja
Ar	Argon
C	Ugljik
CO ₂	Ugljični dioksid
Cu	Bakar
DCEN	<i>Direct Current Electrode Negative</i> – Negativni polaritet istosmjerne struje
DCEP	<i>Direct Current Electrode Positive</i> – Pozitivni polaritet istosmjerne struje
EN	Europska norma
EPP	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška
He	Helij
HRN	Hrvatska norma
IFR	<i>Internation Federation of Robotics</i> – Međunarodna federacija za robotiku
ISO	<i>International Organisation for Standardization</i> – Međunarodna organizacija za standardizaciju
MIG/MAG	<i>Metal Inert/Active Gas</i> - Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog/aktivnog plina
Mn	Mangan
Mo	Molibden
P	Prizmatični tip zgloba
R	Revolutni tip zgloba
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom
SCARA	<i>Selective Compliance Assembly Robot Arm</i>
Si	Silicij
STT	<i>Surface Tension Transfer</i> – Prijenos površinskom napetosti

TIG	Zavarivanje volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina
VP	<i>Variable Polarity</i> – varijabilni polaritet

SAŽETAK

U uvodnom dijelu rada analizirani su osnovni zahtjevi za MAG postupak zavarivanja. Opisane su ključne komponente robotiziranih sustava za zavarivanje, značajke i mogućnosti programiranja robotskih stanica te periferni uređaji robotiziranih sustava za zavarivanje. Posebna pažnja posvećena je WiseThin modificiranom MAG postupku, analizirajući njegove tehničke specifikacije i operativne prednosti.

Eksperimentalni dio rada sastoji se od prikaza izvedbe robotske stanice za WiseThin i MAG postupak zavarivanja i provedbe postupaka zavarivanja na odabranom osnovnom materijalu različitih debljina koristeći oba navedena postupka. Ispitivanja na uzorcima provedena su sukladno normi HRN EN ISO 15614-1. Rezultati ispitivanja su uspoređeni kako bi se utvrdile razlike u kvaliteti zavara, efikasnosti postupaka i operativne prednosti između WiseThin i konvencionalnog MAG zavarivanja.

U zaključnom dijelu rada analizirani su dobiveni rezultati te je donesen zaključak o mogućnostima primjene WiseThin MAG postupka zavarivanja u industrijskoj proizvodnji. Također, navedene su preporuke za daljnju implementaciju ovog postupka u industriji.

Ključne riječi: Robotizirano zavarivanje, MAG postupak zavarivanja, WiseThin modificirani MAG postupak, HRN EN ISO 15614-1

SUMMARY

In the introductory section of the thesis, the basic requirements for MAG welding are discussed. Key components of robotized welding systems, features, and programming capabilities of robotic stations, as well as peripheral devices, are described. Special attention is given to the modified WiseThin MAG process, analyzing its technical specifications and operational advantages.

The experimental part of the thesis consists of configuring a robotic station for WiseThin and MAG welding processes and conducting welding procedures on selected base materials of various thicknesses using both aforementioned processes. Testing on samples was conducted in accordance with the HRN EN ISO 15614-1 standard. The results were compared to determine differences in weld quality, process efficiency, and operational advantages between WiseThin and conventional MAG welding.

In the concluding section, the obtained results were analyzed, and conclusions were drawn about the applicability of the WiseThin MAG welding process in industrial production. Recommendations for further implementation of this process in the industry are also provided.

Key words: Robotised welding, MAG welding process, WiseThin modified MAG process, HRN EN ISO 15614-1

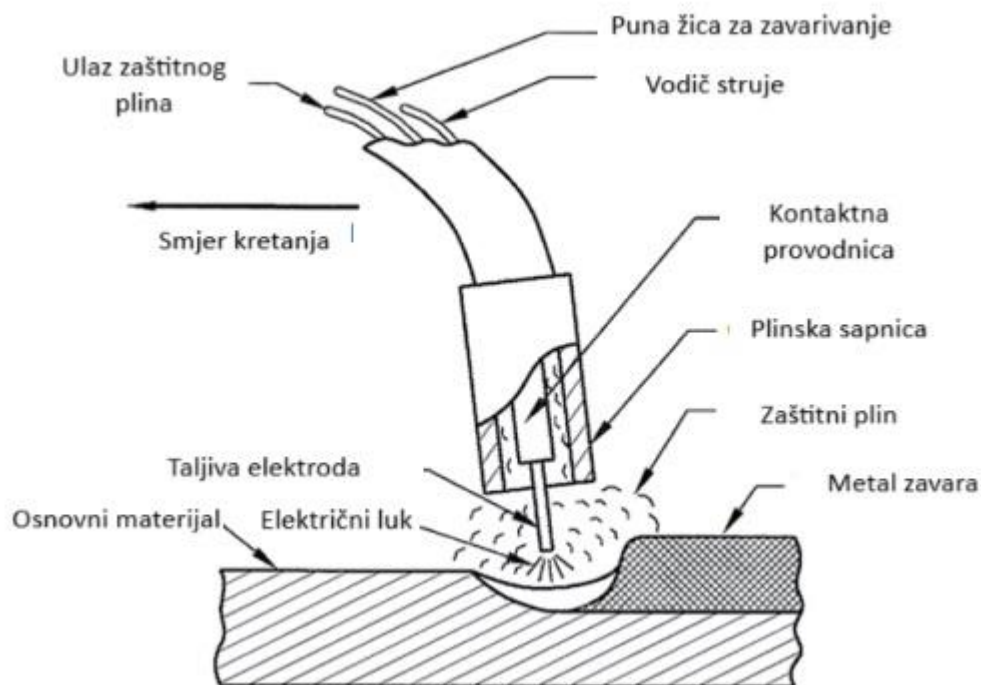
1. UVOD

U današnjoj proizvodnji koja se sve više razvija, tehnološki napredak igra ključnu ulogu u transformaciji tradicionalnih proizvodnih procesa. Jedna od tehnologija koja je promijenila industriju zavarivanja je robotizirano zavarivanje. Robotizirano zavarivanje je inovativna tehnologija koja koristi automatizirane robotske sustave za obavljanje zadataka zavarivanja zbog izrazite preciznosti, učinkovitosti i pouzdanosti [1]. Povijesno gledano, zavarivanje su uglavnom ručno izvodili zavarivači. Iako je ručno zavarivanje i danas u širokoj upotrebi, ono dolazi s ograničenjima kao što su mogućnost ljudske pogreške, nedosljedna kvaliteta zavara i sigurnosni rizici za zavarivače koji rade u opasnim okruženjima. Prednosti robotiziranog zavarivanja očituju se kroz poboljšanu točnost i ponovljivost, zbog čega su mnogi proizvođači opreme za zavarivanje prihvatili ovu tehnologiju.

U usporedbi s zavarivačima, jedan robot za zavarivanje je puno učinkovitiji. Na primjer, kod elektrolučnog zavarivanja, za vrijeme jedne radne smjene vrijeme uspostavljenog električnog luka kod zavarivača iznosi oko 30 posto radnog vremena, dok se kod robota taj postotak povećava na približno 90 posto [1]. Robotizirano zavarivanje može se izvesti s unaprijed programiranim položajem zavarivanja, navođenjem strojnim vidom ili kombinacijom obje metode. Prednosti robotiziranog zavarivanja uključuju povećanu produktivnost, smanjen rizik od ozljeda, niže proizvodne troškove, smanjenje troškova rada, dosljednu kvalitetu i minimalizaciju otpadaka zbog loše izvedenih zavarenih spojeva. Međutim, postoje i neki nedostaci povezani s robotiziranim zavarivanjem, uključujući visoke troškove nabavke samih robota i njihove integracije u sustav proizvodnje, potrebu za specijaliziranom obukom radnika i ograničenu funkcionalnost [1].

2. MIG/MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

MIG/MAG postupak zavarivanja, poznat i kao elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog/aktivnog plina (eng. *Metal Inert Gas/Metal Active Gas*), koristi se u raznim industrijama zbog svoje praktičnosti i jednostavnosti rada. Kako je prikazano na slici 1., postupak koristi kontinuiranu žičanu elektrodu i zaštitni plin za stvaranje električnog luka za taljenje osnovnog metala. MIG postupak (eng. *Metal Inert Gas*) koristi inertne plinove poput argona i helija (Ar/He), odnosno mješavine plinova koji ne reagiraju s dodatnim materijalom ili talinom, dok MAG postupak (eng. *Metal Active Gas*) kao zaštitu koristi najčešće ugljični dioksid (CO_2) ili mješavine aktivnih plinova [2].



Slika 1. Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom žicom i zaštitnim plinom [2]

Kod MIG/MAG postupka, žica se kontinuirano dovodi do mjesta zavarivanja kroz pištolj za zavarivanje. Zbog topline oslobođene u električnom luku tale se osnovni materijal i vrh elektrode. Kapljice s vrha žice deponiraju se u talinu, a nakon solidifikacije ostvaruje se nerastavljivi zavareni spoj. Zaštitni plin, koji struji kroz mlaznicu pištolja za zavarivanje, štiti rastaljene kapljice od atmosferske kontaminacije, osiguravajući adekvatan zavar.

MIG/MAG zavarivanje poznato je po svojim visokim stopama deponiranog materijala, dobroj penetraciji i sposobnosti zavarivanja širokog raspona materijala različitih debljina. Ovaj se postupak naširoko koristi u industrijskim primjenama zbog brojnih prednosti. Njime se može zavarivati gotovo sve metalne materijale, u velikom rasponu debljina (od jedan mm do 30 mm ili više) i učinkovit je u svim položajima zavarivanja [3]. MIG/MAG je vrlo ekonomičan postupak jer pruža brže zavarivanje i veću produktivnost nego na primjer ručno elektrolučno zavarivanje (REL). Ne zahtijeva česta zaustavljanja zbog promjene elektrode, kao što je slučaj s prethodno spomenutim postupkom. Osim toga, potrebno je minimalno čišćenje zavara jer troske gotovo nema. Potrebna je manja vještina zavarivača nego za druge konvencionalne postupke jer se elektrodna žica dovodi automatski (poluautomatski proces), a mehanizam za unutarnju kontrolu duljine luka održava duljinu luka približno konstantnom čak i kada udaljenost pištolja za zavarivanje od radnog komada varira unutar određenih granica. Ove prednosti čine postupak vrlo pogodnim za automatizaciju, a posebno za robotizaciju [3].

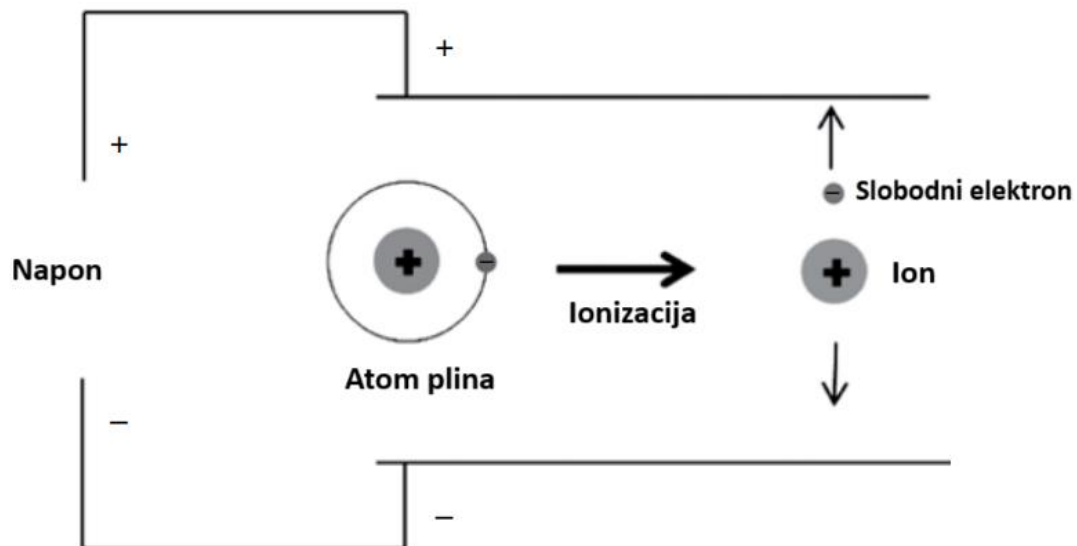
Proces je osjetljiv na djelovanje vjetra, koji može raspršiti zaštitni plin, a teško ga je koristiti u uskim prostorima zbog dimenzija pištolja za zavarivanje. Nedostatak zaštitnog plina, nepravilno dovodjenje žice, nestabilni luk mogu dovesti do diskontinuiteta u zavarenom spoju poput poroznosti, nepotpune penetracije, prekomjernog taljenja, ugorina ili pukotina [3].

2.1. Osnovni principi MIG/MAG zavarivanja

Kod svih elektrolučnih postupaka, uspostavom električnog luka zatvara se električni krug. Električni krug sastoji se od izvora struje za zavarivanje, elektrode, kabela mase i radnog komada koji se zavaruje. Napon koji daje izvor struje za zavarivanje je u rasponu od 70 do 100 V i on se naziva naponom praznog hoda. Takav raspon napona je dovoljno velik da uspostavi i održava električni luk, a dovoljno je nizak da minimizira rizik od električnog šoka. Napon u električnom luku je u rasponu od 10 do 40 V [4].

2.1.1. Električni luk

Električni luk je vrsta električnog pražnjenja koje se odvija između dvije elektrode, a kod MIG/MAG zavarivanja su to dodatni materijal u obliku žice i radni komad [4]. Takvo intenzivno izbijanje elektrona javlja se kada se dovoljan napon narine preko zazora što uzrokuje raspadanje atoma plina, to jest ionizaciju, koja je prikazana na slici 2, ili disocijaciju molekula plina.



Slika 2. Ionizacija atoma plina u električnom luku [3]

Plin je obično izolator električne energije, ali kada se ionizira postaje vodič električne energije. Do ionizacije dolazi kada atomi plina izgube vezane elektrone koji se tada slobodno kreću u plinskoj smjesi i tako prenose električnu energiju. Takvi, sada slobodni elektroni, pod utjecajem električnog polja sudaraju se s okolnim atomima plina, pospješujući proces ionizacije. Kada je plin dovoljno ioniziran, omogućava lakši protok elektrona, što omogućava uspostavu stabilnog električnog luka [3].

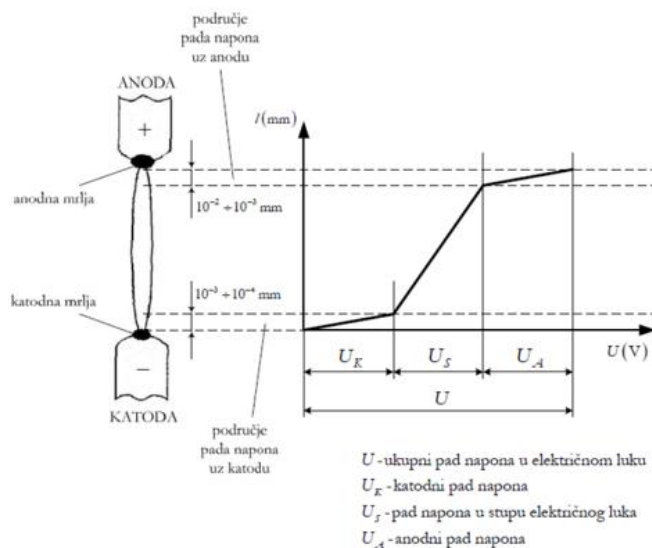
Ionizirani plin sastoji se od slobodnih elektrona koji se kreću u jednom smjeru i pozitivnih iona koji putuju u suprotnom smjeru. Sudari s pretežno neutralnim atomima rezultiraju značajnim zagrijavanjem plina, učinkovito pretvarajući luk u značajan otpornik. Toplina oslobođena zbog električnog otpora održava proces ionizacije. Osim toga, zbog visoke temperature dolazi do elektromagnetskog zračenja koje se manifestira kao karakteristični sjaj električnog luka. Izvan vidljivog spektra, emitira se i znatna količina svjetlosti nevidljivih infracrvenih i ultraljubičastih valnih duljina. Ionizirani, sjajni plin koji čini luk često se naziva plazma. Kako bi se električni luk održao, izvor struje za zavarivanje mora kontinuirano osiguravati potrebnu struju i napon za održavanje električnog luka [5].

Temperature električnog luka mogu doseći i 20 000 °C. Temperatura je najviša u središtu luka, dok je temperatura u vanjskim dijelovima manja zbog gubitka topline prema okolini kroz konvekciju, kondukciju i zračenje [5].

Kod MIG/MAG postupka zavarivanja, luk omogućava taljenje elektrode, stvarajući rastopljene kapljice dodatnog materijala koje prelaze preko luka u talinu osnovnog i dodatnog materijala. Karakteristike ovih kapljica, uključujući njihovu veličinu, oblik i način prijenosa kroz električni luk, nazivaju se načini prijenosa metala, a pobliže su objašnjeni u nastavku rada. Način na koji se rastaljeni metal prenosi s elektrode u talinu ključan je faktor za kvalitetu i učinkovitost zavarenog spoja. Tijekom prijenosa metala, neke rastaljene kapljice mogu biti izbačene iz električnog luka ili taline i zalijepiti se za okolnu površinu. Ta pojava naziva se rasprskavanje i uobičajeni je problem koji utječe na kvalitetu kod MIG/MAG zavarivanja [5].

2.1.2. Napon električnog luka

Napon luka, koji se nalazi u rasponu od 10 do 40 V, usko je povezan s duljinom luka. Kada se duljina luka poveća, napon luka također raste, a kada se duljina luka smanji, smanji se i napon luka. Električni luk može se podijeliti u tri područja: područje anodnog pada napona, područje katodnog pada napona i područje pada napona u stupu električnog luka. Kao što je prikazano na slici 3, pad napona električnog luka je neravnomjerno raspoređen zbog postojanja volumenskog naboja u ioniziranom prostoru električnog luka. U području katodnog pada napona pozitivni ioni stvaraju volumenski naboj koji izaziva pad napona, dok u području anodnog pada napona elektroni stvaraju volumenski naboj. Ova područja čine značajan dio pada napona u električnom luku. U prostoru plazmenog stupa, pozitivni ioni i elektroni su ravnomjerno raspoređeni te nema prostornog naboja, stoga je potrebna energija elektrona da se savlada zazor, a ona je proporcionalna duljini luka [4].



Slika 3. Pad napona u električnom luku [4]

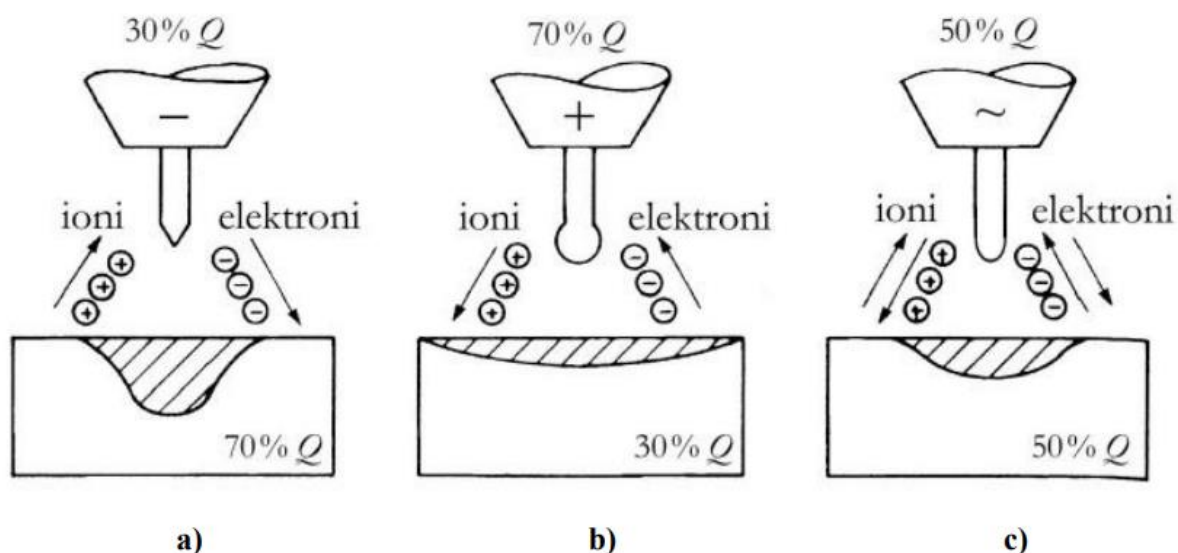
Padovi napona na anodi i katodi su minimalno pogođeni promjenama duljine luka te čak i kod vrlo kratkog luka napon je znatno veći od nule. Zbog toga što je rasipanje snage električnog luka funkcija napona i jakosti struje, a jakost struje je konstantna kroz cijelu duljinu luka, upravo područja uz anodu i katodu doživljavaju najveće rasipanje snage električnog luka i omogućuju taljenje dodatnog i osnovnog materijala u tim točkama.

Za ionizaciju plina preko zazora potrebni su viši naponi od napona praznog hoda izvora struje za zavarivanje, stoga kod se MIG/MAG postupka električni luk uspostavlja dodirivanjem vrha žice i radnog komada što uzrokuje kratki spoj. Izvor struje za zavarivanje daje vrlo visoku struju kratkog spoja, oslobađajući dovoljno topline koja brzo tali žicu te tako održava potrebnu duljinu luka za stabilan električni luk [6].

2.1.3. Polaritet

Polaritet na koji se priključuje elektroda na izvoru struje za zavarivanje ključan je za rad samog postupka. Polaritet određuje smjer protoka struje unutar električnog luka. U zavarivačkoj literaturi često se struja opisuje kao protok elektrona od negativne prema pozitivnoj elektrodi. Međutim, prema standardnoj elektrotehničkoj konvenciji, struja teče od pozitivne prema negativnoj elektrodi, odnosno u smjeru pozitivno nabijenih iona [5].

Kod zavarivačkog luka, smjer kretanja elektrona, od negativne elektrode (katode) prema pozitivnoj elektrodi (anodi) ima različite učinke kod različitih postupaka zavarivanja. Kada je elektroda na negativnom polu izvora struje za zavarivanje, a radni komad na pozitivnom polu izvora struje, to se naziva DCEN (eng. *DC Electrode Negative*) ili zavarivanje istosmjernom strujom s elektrodom na minus polu. Elektroni izlaze iz elektrode, prolaze kroz električni luk i ulaze u radni komad. Kada je elektroda pozitivna u odnosu na radni komad, to se naziva DCEP (eng. *DC Electrode Positive*) ili zavarivanje istosmjernom strujom s elektrodom na plus polu. Utjecaj polariteta i vrste struje na profil zavara prikazan je na slici 4, a o tom mehanizmu ovisi i intenzivnost zagrijavanja elektrode i radnog komada [6].



Slika 4. Smjer gibanja elektrona i intenzivnost zagrijavanja ovisno o vrsti i polaritetu struje: a) DCEN, b) DCEP, c) AC [6]

Ostale opcije polariteta uključuju AC (izmjenična struja) i VP (varijabilni polaritet), koji se odnose na složenije i varijabilnije naponske valne oblike od jednostavne izmjenične struje. U oba slučaja, polaritet i smjer protoka elektrona se izmjenjuju [5].

Učinak polariteta na unos topline i ponašanje električnog luka varira ovisno o postupku zavarivanja i karakteristikama materijala koji se zavaruju. Kod MIG/MAG postupka zavarivanja, upotreba istosmjerne struje s elektrodom na minus polu nije prikladna jer žičana elektroda zbog nedovoljno topline ne može postići termičku emisiju elektrona te zbog toga DCEN stvara nestabilan luk koji je teško kontrolirati. Kod istosmjerne struje s elektrodom na plus polu radni komad je na negativnom polaritetu, a najveća količina topline prenosi se na radni komad gdje se elektroni stabilnije emitiraju. To je uglavnom zbog oksida na površini radnog komada koji olakšavaju proces emisije elektrona. Krajnji rezultat je puno stabilniji luk, što je razlog zašto se polaritet DCEP gotovo isključivo koristi kod MIG/MAG zavarivanja [5].

2.1.4. Unos topline pri zavarivanju

Energija ili unos topline koji se javlja kod zavarivanja električnim lukom određuje niz faktora o kojima posljedično ovise količina deformacija i zaostalih naprezanja u zavaru, oblik i geometrija zavara, ali i korozivna postojanost zavarenog spoja. Unos topline se navodi u specifikaciji postupka zavarivanja sukladno normi HRN EN ISO 15609 i u kvalifikaciji postupka zavarivanja sukladno normi HRN EN ISO 15614, a izračunava se prema sljedećoj formuli definiranoj u normi HRN EN 1011-1:

$$Q = k \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

Gdje su:

Q – unesena toplina, kJ/mm

k – koeficijent iskoristivosti topline električnog luka (određeno tablicom 1)

U – napon zavarivanja, V

I – struja zavarivanja, A

v – brzina zavarivanja, mm/s

Kako je prikazano jed. (1), unos topline izražava se kao energija po jedinici duljine te je ona funkcija napona, struje i brzine zavarivanja. Napon se prvenstveno bira da bi se održala stabilnost luka i važno je da ne varira u velikom rasponu kao parametar za toplinski unos. Koeficijent iskoristivosti topline električnog luka se odnosi na postotak topline proizvedene električnim lukom koja se prenosi na zavar, a iznosi koeficijenta za određene postupke zavarivanja su dani u tablici 1.

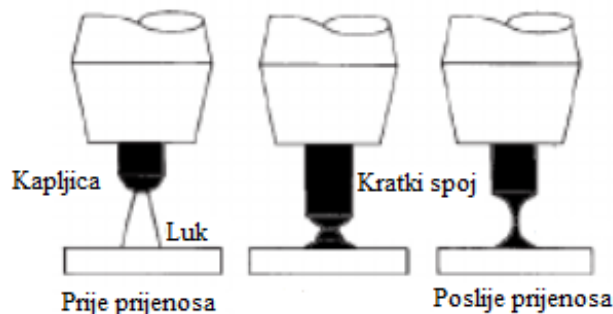
Tablica 1. Koeficijent iskoristivosti topline električnog luka za određene postupke zavarivanja [6]

Oznaka postupka prema HRN EN ISO 4063	Postupak zavarivanja	Koeficijent iskoristivosti topline električnog luka, k
121	EPP	1,0
111	REL	0,8
131	MIG	0,8
135	MAG	0,8
141	TIG	0,6

2.1.5. Načini prijenosa dodatnog materijala

Kod MIG/MAG zavarivanja mogu se postići različiti načini prijenosa dodatnog materijala za zavarivanje. Četiri najčešće korištena načina su prijenos metala kratkim spojevima, prijenos metala prijelaznim lukom, prijenos metala štrcajućim lukom i prijenos metala impulsnim lukom. U novije vrijeme razvijeni su i neki novi načini prijenosa dodatnog materijala, od kojih valja spomenuti još i prijenos metala rotirajućim lukom i STT prijenos [6]. Načini prijenosa metala ovise o jakosti struje, naponu električnog luka, vrsti i promjeru dodatnog materijala te o vrsti zaštitnog plina ili mješavine. Način prijenosa materijala utječe na količinu depozita rastaljenog materijala, brzinu zavarivanja, unos topline u materijal, mogućnost zavarivanja u različitim položajima, debljinu materijala koji se može zavarivati i na mogućnost premošćivanja zazora [4].

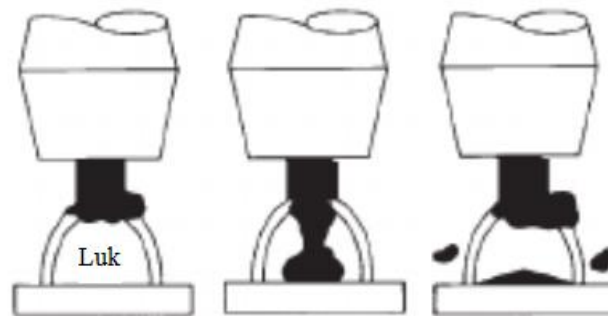
Do prijenosa metala kratkim spojevima dolazi kod niskog iznosa napona i struje zavarivanja. Tijekom načina prijenosa kratkim spojevima, prikazanog na slici 5, žica za zavarivanje povremeno dolazi u dodir s radnim komadom uzrokujući kratki spoj. Frekvencija kratkih spojeva ovisi o promjeru žice i nametnutih parametara, a obično ima i do 200 kratkih spojeva u sekundi [4].



Slika 5. Prijenos dodatnog materijala kratkim spojem [7]

Prilikom kratkog spoja razvija se toplina koja tali žicu i stvara male kapljice rastaljenog materijala koje prelaze u talinu. Prijenos kratkim spojevima karakterizira dobra kontrola nad talinom te se dobivaju zavari malog presjeka što je pogodno za zavarivanje tankih limova i spojeva kod kojih se zahtijevaju vrlo male deformacije, jer se spomenutim načinom prijenosa unosi mala količina topline u radni komad. Prednost zavarivanja kratkim spojevima je mogućnost zavarivanja u svim položajima i visoka iskoristivost žice za zavarivanje, dok su nedostaci povećano rasprskavanje i mogućnost pojave naljepljivanja kod zavarivanja. Ovim prijenosom metala najčešće se zavaruju korijeni zavara u otvorenom žlijebu [4].

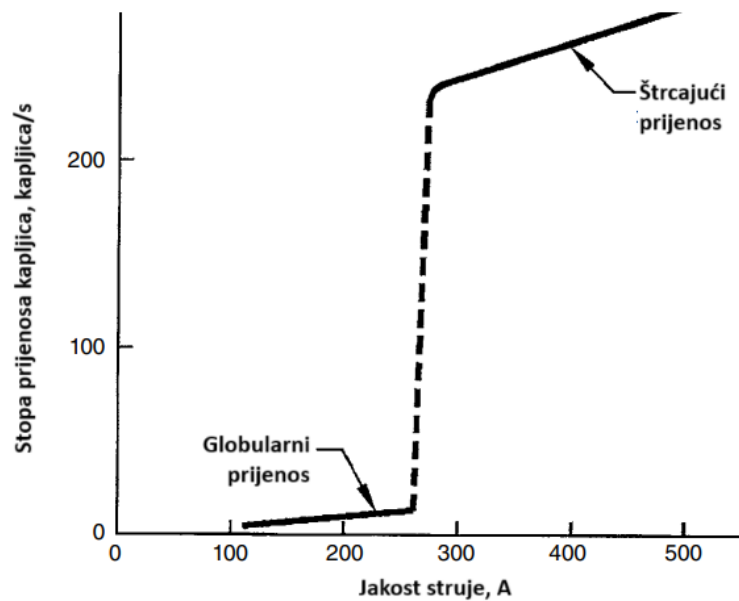
Globularni prijenos ili prijenos metala prijelaznim lukom, prisutan je pri višim vrijednostima struje i napona, kombinacijom prijenosa metala štrcajućim lukom i slučajnim kratkim spojevima. Pri ovoj vrsti prijenosa metala, na vrhu žice stvaraju se veće, često nepravilne kapljice koje se odvajaju od vrha žice i padaju u talinu, kao što je prikazano na slici 6.



Slika 6. Prijenos metala prijelaznim lukom [7]

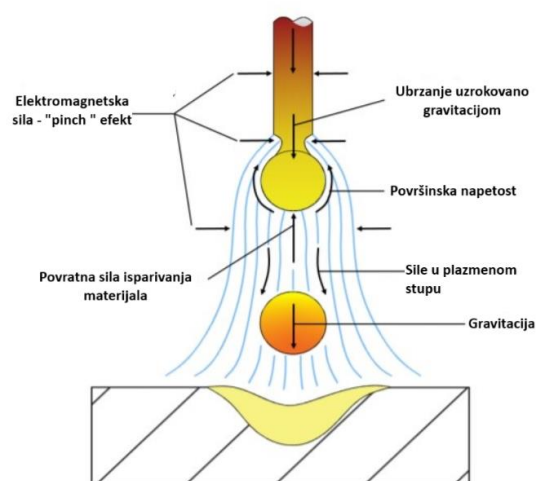
Prijenos je nepravilniji u usporedbi s prijenosom kratkim spojevima. Luk ostaje stabilan, a kapljice se silom gravitacije prenose u talinu. Kvaliteta spoja je u pravilu lošija zbog neregularnosti prijenosa metala štrcajućim lukom i kratkim spojevima, jer nastaju kapljice različitih promjera što nepovoljno utječe na geometriju zavarenog spoja. Prijenos kapljica nije aksijalan te je rasprskavanje povećano [6]. Mješoviti prijenos obično se koristi za deblje materijale i može rezultirati višim stopama taloženja, a javlja se prvenstveno pri upotrebi CO₂ kao zaštitnog plina. Zbog mnogobrojnih nedostataka mješovitog luka poput povećanog rasprskavanja, pojave slučajnih kratkih spojeva, mogućnosti zavarivanja samo u horizontalnom položaju i relativno male iskoristivosti žice za zavarivanje ovaj način prijenosa materijala se, ukoliko je to moguće, nastoji izbjeći [4].

Prijenos štrcajućim lukom je metoda prijenosa metala koja se obično koristi za zavarivanje aluminija i nehrđajućih čelika uz upotrebu inertnog zaštitnog plina. Koristi veće iznose struje i napona u odnosu na kratki i mješoviti luk. Za dani promjer žice, prijelaz iz mješovitog načina prijenosa metala u način štrcajućeg prijenosa događa se prilično naglo pri jakosti struje koja se naziva kritična struja prijelaza, kao što je prikazano na slici 7. Kada struja prijeđe ovu prijelaznu točku, dolazi do štrcajućeg prijenosa metala, a kada je iznos struje ispod te točke, dolazi do mješovitog prijenosa [5].



Slika 7. Kritična struja prijelaza iz prijelaznog u štrcajući način prijenosa materijala [2]

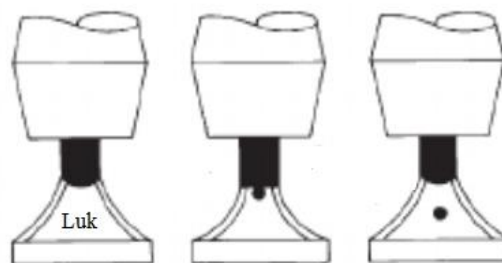
Veći promjeri elektroda zahtijevaju više prijelazne struje. Kao što je prikazano na slici 7, prijelaz na način prijenosa štrcajućim lukom povezan je sa znatnim povećanjem stope prijenosa kapljica. Ovaj prijelaz također rezultira značajnim smanjenjem volumena svake kapljice u usporedbi s mješovitim prijenosom. Prijelaz u štrcajući luk izravno je povezan s fenomenom elektromagnetskog stiskanja na vodič ili takozvanim „*pinch*“ efektom prikazanim na slici 8.



Slika 8. Utjecaj elektromagnetske sile na otkidanje rastaljenih kapljica kod prijenosa štrcajućim lukom [8]

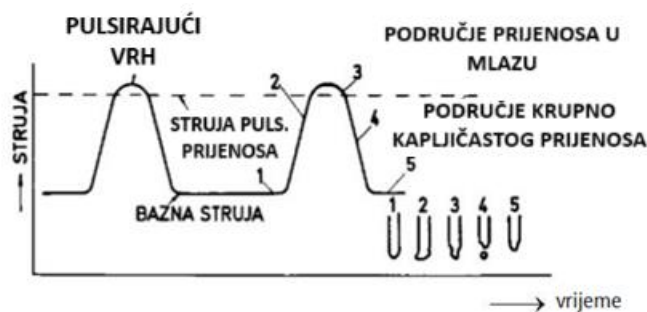
Kada struja teče kroz vodič, stvara okolno magnetsko polje koje rezultira unutarnjom silom na vodič. Kako se gustoća struje povećava, tako se povećava i unutarnja sila stiskanja, koja djeluje na rastaljene kapljice koje se formiraju na kraju žice, stiskajući ih i otkidajući. Zato način prijenosa štrcajućim lukom zahtijeva dovoljno visoke gustoće struje. Gravitacija i površinska napetost između rastaljene kapljice, žice i okolnog plina također utječu na otkidanje kapljice. Površinska napetost ovisi o vrsti korištenog zaštitnog plina, zato su za postizanje prijenosa štrcajućim lukom potrebne plinske mješavine koje sadrže najmanje 80 % argona [5].

Prijenos metala štrcajućim lukom karakterizira brzi prijenos metala taljive elektrode za zavarivanje duž stabilnog električnog luka od elektrode do radnog komada, kao što je prikazano na slici 9. Rezultat je visokokvalitetni završetak zavara s minimalnim rasprskavanjem. Prijenos štrcajućim lukom omogućuje velike brzine zavarivanja, duboku penetraciju i izvrsne karakteristike taljenja, što ga čini prikladnim za deblje materijale i zahtjevne primjene. Prijenos štrcajućim lukom najprikladniji je za ravne i vodoravne položaje zavarivanja, a može se koristiti i za zavare okomito prema dolje uz određena ograničenja [6].



Slika 9. Prijenos metala štrcajućim lukom [7]

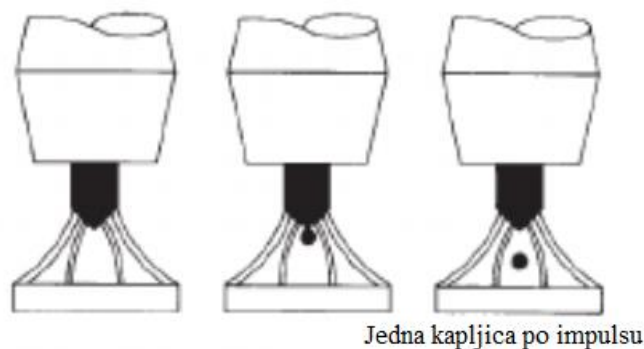
Kod načina prijenosa metala impulsnim lukom, struja za zavarivanje se mijenja između visoke prijenosne struje rasprskavanja i niske pozadinske struje kao što je prikazano na slici 10.



Slika 10. Karakteristika struje impulsnog prijenosa metala [9]

Kratki, visokoenergetski impulsi daju dovoljno energije za taljenje žice i stvaranje kontroliranog prijenosa malih kapljica, dok niska pozadinska struja omogućuje hlađenje taline prije sljedećeg impulsa tako smanjujući zonu utjecaja topline [3]. Time se smanjuje rizik od deformacije materijala, posebno kod tankih materijala. Kontrola valnog oblika struje osigurava stabilan luk i nema rasprskavanja jer ne dolazi do kratkog spoja. Podešavanjem jakosti impulsa, a time i frekvencije odvajanja kapljica, može se podešavati veličina rastaljenih kapljica. Hlađenje rastaljene metalne kupke tijekom pozadinskog ciklusa čini impulsni prijenos drugačijim od prirodnog prijenosa metala štrcajućim lukom [6].

U idealnom slučaju, u svakom ciklusu jedna kapljica prelazi s elektrode u talinu kao što je prikazano na slici 11.



Slika 11. Prijenos metala impulsnim lukom [7]

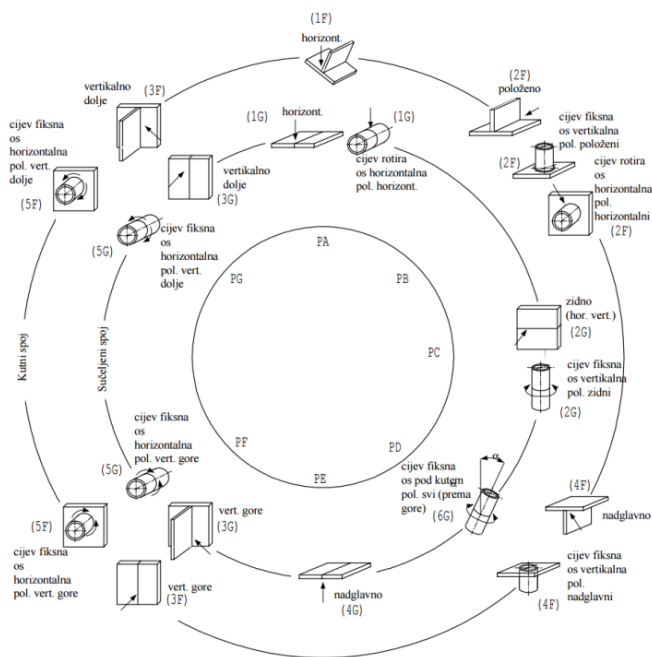
Zbog niske pozadinske struje, ovaj način prijenosa može se koristiti za zavarivanje u svim položajima. Impulsni način prijenosa može se koristiti za smanjenje unosa topline i smanjenje deformacija kada velike brzine zavarivanja nisu potrebne ili se ne mogu postići zbog opreme ili ograničenja protoka zaštitnog plina [8].

2.1.6. Položaj zavarivanja

Položaj zavarivanja odnosi se na položaj zavarivača u odnosu na mjesto zavarenog spoja. Budući da je zavarivanje u nekim položajima puno jednostavnije nego u drugima, položaj je vrlo važan aspekt u kvalifikaciji i postupka zavarivanja i zavarivača. Na primjer, zavarivač može biti dovoljno vješt da izvede zavareni spoj u horizontalnom položaju, ali ne i dovoljno vješt da isti zavar izvede u vertikalnom položaju [5].

Položaji zavarivanja označavaju se kombinacijom brojke i slova, a prikazani su na slici 12. Broj se odnosi na poziciju, dok se slovo odnosi na tip zavara: F za kutni zavar ili G za sučeljeni zavar. Kada

se spominju položaji zavarivanja, potrebno je odrediti radi li se o ploči ili cijevi. Sučeljene pozicije zavora odnose se na spojeve među pločama ili cijevima, dok se kutne pozicije zavora odnose na T spojeve koji se primjenjuju na ploče ili spojeve cijevi i ploče [10].



Slika 12. Položaji zavarivanja prema HRN EN ISO 6947 [11]

2.1.7. Dodatni materijal

Žice za MAG zavarivanje izrađuju se izvlačenjem kao pune žice promjera od 0,6 mm do 2,4 mm. Žice od čeličnih materijala su poniklane ili pobakrene zbog zaštite od korozije i boljeg električnog kontakta [4]. Žica za MAG zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika sadrži 0,14-0,16 % Mn, 0,7-1 % Si, 0,06-0,13 % C i $\leq 0,3$ % Cu [12]. Osim punih žica koriste se i žice punjene praškom, koje se izrađuju u promjerima od 1,0 mm do 3,2 mm te mogu imati razne presjeke. Takve žice same stvaraju zaštitnu atmosferu raspadanjem jezgre pa se ne zahtijeva dodatna zaštita plinom. Obje vrste žica namotane su na namote standardnih veličina koji se postavljaju u uređaj za dodavanje žice. Osnovni zahtjevi koje žice za MAG zavarivanje moraju zadovoljiti su: moraju biti istog promjera cijelom dužinom, moraju biti pravilno namotane, površina ne smije biti onečišćena i mora biti glatka [4].

Prema Europskim normama (EN), žice za zavarivanje označavaju se na specifičan način kako bi se osigurala dosljednost i kvaliteta. Glavna norma koja se koristi za označavanje žica za zavarivanje je

EN ISO 14341 za žice od nelegiranog i sitnozrnatog čelika. Oznaka žice za zavarivanje prema EN ISO 14341 sastoji se od nekoliko dijelova, gdje svaki dio daje specifične informacije o svojstvima žice:

1. vrsta materijala: navodi osnovni materijal žice
2. minimalna vlačna čvrstoća: označava minimalnu vlačnu čvrstoću zavarenog spoja
3. vrsta obloga ili jezgre: označava vrstu zaštitnog plina ili jezgre žice
4. kemijski sastav: označava ključne legirajuće elemente prisutne u žici.

Na primjer, oznaka G 42 4 M 21 3Ni1 daje određene informacije o dodatnom materijalu koje su prikazane u tablici 2.

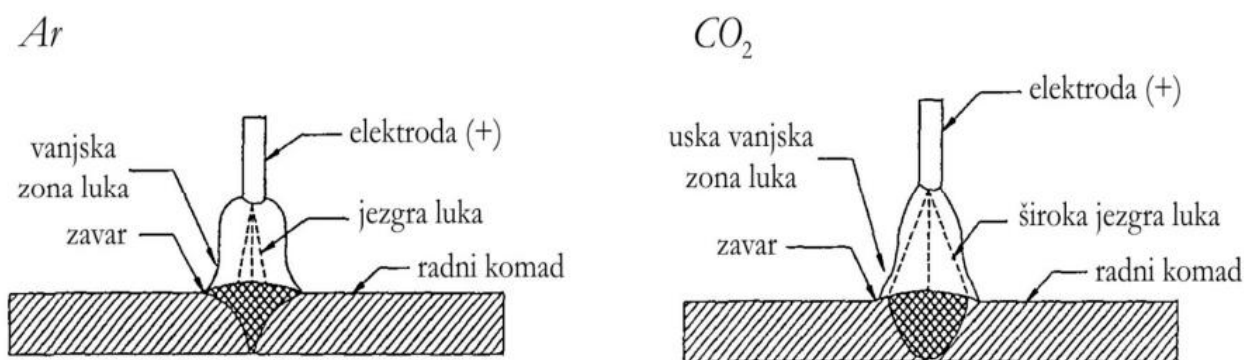
Tablica 2. Značenje oznake žice G 42 4 M21 3Si1 prema EN ISO 14341 [13]

Značenje oznake žice G 42 4 M21 3Si1 prema EN ISO 14341		
Postupak zavarivanja	G	Elektrolučno zavarivanje u plinskoj zaštiti metalnom taljivom žicom (MIG/MAG)
Mehanička svojstva zavarenog spoja	42	Minimalna vlačna čvrstoća od 420 MPa
Klasa udarne radnje loma	4	47 J na - 40°C
Zaštitni plin prema HRN – EN 439	M21	Mješavina Ar i CO ₂ (volumni postotak CO ₂ od 5 do 25 %)
Kemijski sastav	3Si1	U postotcima: C: 0,06-0,14, Si: 0,7-1,0, Mn: 1,3-1,6, Ni: 0,15, Mo: 0,15, Al: 0,02, Ti i Zr: 0,15

Ovakva detaljna oznaka omogućava zavarivačima i koordinatorima zavarivanja da brzo i točno identificiraju odgovarajuću žicu za specifične potrebe zavarivanja, osiguravajući kvalitetne i pouzdane zavare prema zahtjevima projekta. Proizvođači žica za zavarivanje imaju svoje oznake žica te je za odabir odgovarajuće žice za zavarivanje potrebno koristiti katalog proizvoda proizvođača [6].

2.1.8. Zaštitni plinovi

Kada se metali zagrijevaju do visokih temperatura koje se približavaju ili premašuju njihovu točku taljenja, reakcije s okolnom atmosferom se ubrzavaju i metali postaju vrlo osjetljivi na kontaminaciju. Kontaminacija elementima poput kisika, dušika i vodika može rezultirati stvaranjem krhkih faza kao što su oksidi i nitridi, kao i poroznošću koja nastaje zbog zarobljavanja plinova koji stvaraju mjehuriće pri skrućivanju zavara. Kako bi se izbjegla kontaminacija, metal mora biti zaštićen dok se skrućuje i počinje hladiti. Zaštita je važna ne samo za zaštitu rastaljenog metala žice, već i za zaštitu zagrijanog metala koji okružuje zavar. Zaštitni plin također utječe i na način prijenosa metala, oblik i strukturu električnog luka, kemijski sastav spoja, definira izgled i geometrijski oblik zavarenog spoja kao što je prikazano na slici 13, utječe na viskozitet taline i na mehanička svojstva spoja [6].



Slika 13. Utjecaj vrste zaštitnog plina na geometriju i oblik zavara [6]

Plinovi koji se koriste pri MAG zavarivanju su: ugljični dioksid (CO_2) te dvokomponentne i trokomponentne mješavine argona (Ar), ugljičnog dioksida (CO_2), kisika (O_2) i Helija (He) dok se vodik (H_2) i dušik (N_2) koriste u manjim količinama. Argon, helij i ugljični dioksid mogu se koristiti bez miješanja s drugim plinovima, dok se kisik, dušik i vodik dodaju prethodnim plinovima u određenom postotku radi povoljnijeg odvijanja fizikalno-kemijskih procesa kod zavarivanja. Kemijska reaktivnost, u kontekstu zaštitnih plinova, odnosi se na sklonost pojedinog plina da pri visokim temperaturama električnog luka reagira s elementima prisutnima u talini. Argon i helij su, primjerice, potpuno neaktivni, odnosno inertni plinovi i prema tome nemaju nikakav kemijski utjecaj na zavar. Dušik je pri sobnim temperaturama također inertan, no u temperaturnim uvjetima zavarivanja postaje reaktivan i može imati nepoželjan utjecaj na kemijski sastav metala zavara. CO_2 i kisik spadaju u kategoriju reaktivnih plinova poznatu kao aktivne komponente odnosno oksidanse. Ovi plinovi reagiraju s rastaljenim metalom u luku i u talini stvarajući pri tome okside, a nerijetka

posljedica reakcija su otpadni plinovi. Vodik je također reaktivan, ali je po svojoj prirodi reducens, što znači da reagira s oksidacijskim sredstvima te tako sprječava nastajanje oksida u talini. Vodik u većim količinama postaje izuzetno štetan jer može uzrokovati pojavu hladnih pukotina, poroznosti i drugih grešaka u zavarenim spojevima [6].

Utjecaj zaštitnih plinova na vrstu luka, a s time u vezi i na način prijenosa rastaljenog materijala u električnom luku je značajan. Kod zavarivanja u zaštiti inertnim plinovima nema načina prijenosa materijala kratkim spojevima već je način prijenosa materijala samo štrcajućim lukom jer svojstva plina utječu na usitnjavanje kapljica metala [6]. Zavarivanje u zaštiti različitih plinskih mješavina različito utječe na ponašanje električnog luka. Ako je mješavina na bazi argona i kisika onda su kapljice manje i luk je pretežno štrcajući. Kod udjela 20 – 25 % CO₂ u mješavini s argonom pojačan je utjecaj CO₂ na način prijenosa metala kod zavarivanja, jer CO₂ stimulira nastanak krupnih kapi rastaljenog metala te nemirnog električnog luka. Zbog toga se koriste mješavine Ar i CO₂ s njegovim udjelom do najviše 20 %. Kisik kao treća komponenta smanjuje površinsku napetost taline i usitnjava kapljicu metala pri prijenosu kroz električni luk. Različite kombinacije plinova utječu na stabilnost luka, toplinsko opterećenje, oksidaciju, poroznost, premošćivanje zazora, rasprskavanje, toplinski unos i vrstu električnog luka kako je prikazano u tablici 3.

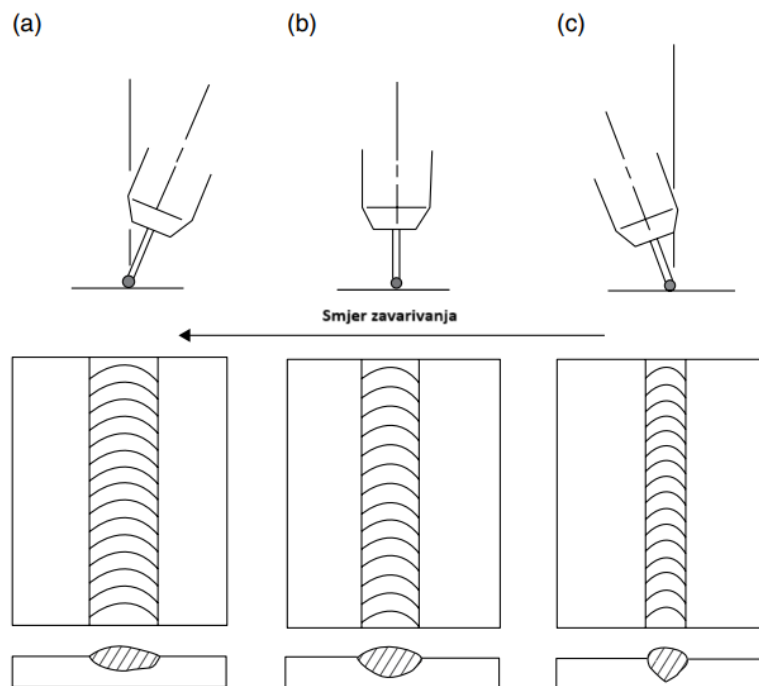
Tablica 3. Svojstva tipičnih zaštitnih plinova pri MIG/MAG zavarivanju [6]

Svojstva	Zaštitna atmosfera		
	Ar/CO ₂	Ar/O ₂	CO ₂
Penetracija u ravnom položaju	Dobra	Dobra	Dobra
Penetracija izvan ravnog položaja	Pouzdanija uz povećanje udjela CO ₂	Može postati kritična ako fluidna talina vodi luk	Pouzdana
Toplinsko opterećenje na pištolju za zavarivanje	Niže uz povećanje razine CO ₂	Visoko; prekomjerna temperatura pištolja za zavarivanje može ograničiti performanse	Nisko zbog dobre toplinske provodljivosti

Stupanj oksidacije	Viši uz povećanje razine CO ₂	Visok; npr. pri 8 % O ₂	Visok
Poroznost	Niža uz povećanje razine CO ₂	Najosjetljivija	Pouzdana
Premošćivanje zazora	Bolje uz smanjenje razine CO ₂	Dobro	Lošije nego kod mješavina plinova
Rasprskavanje	Povećanje uz povećanje razine CO ₂	Nisko	Najviše rasprskavanja, povećava se s povećanjem jakosti struje
Toplinski unos	Povećanje uz povećanje razine CO ₂	Najniži	Visok
Stopa hlađenja	Niža stopa hlađenja, manja opasnost od pucanja	Visoka stopa hlađenja, veća opasnost od pucanja	Niska stopa hlađenja, mala opasnost od pucanja
Vrsta električnog luka	Kratki luk, Prijelazni luk, Štrcajući luk, Impulsni luk do 20 % CO ₂ , Visokoperformanski kratki luk, Visokoperformanski štrcajući luk	Kratki luk, Prijelazni luk, Štrcajući luk, Impulsni luk, Visokoperformanski kratki luk, Rotirajući luk	Kratki luk

2.1.9. Tehnika rada

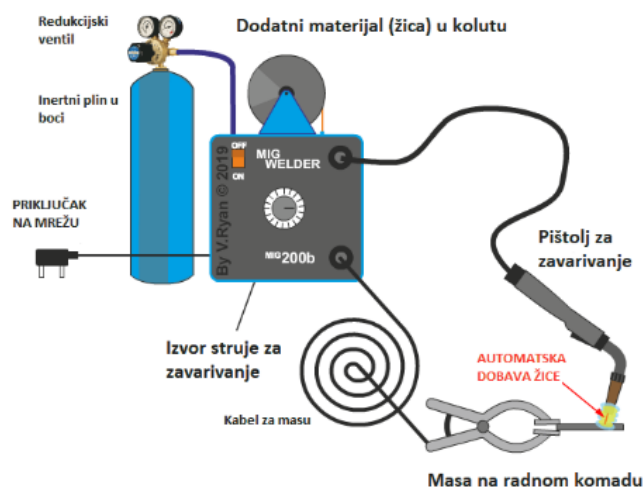
Tehnika zavarivanja značajno utječe na profil zavara. Kao što je prikazano na slici 14, desna tehnika rada ili povlačenje (*eng. pull* ili *backhand*), obično rezultira dubljom penetracijom i užim profilom zavara s većom konveksnosti u usporedbi s lijevom tehnikom, odnosno guranjem (*eng. push* ili *forehand*). Kut povlačenja, koristeći desnu tehniku rada, od oko 25° osigurava najdublju penetraciju, dok kutevi između 5–15° obično pružaju najbolju kontrolu taline i optimalnu zaštitu. Konačan izbor kuta nagiba pištolja za zavarivanje ovisi o raznim faktorima, uključujući vrstu i debljinu materijala koji se zavaruju, željeni profil zavara i preferencije zavarivača.



Slika 14. Utjecaj tehnike rada na profil zavara. a) lijeva tehnika, b) neutralna tehnika, c) desna tehnika [6]

2.2. Oprema za zavarivanje

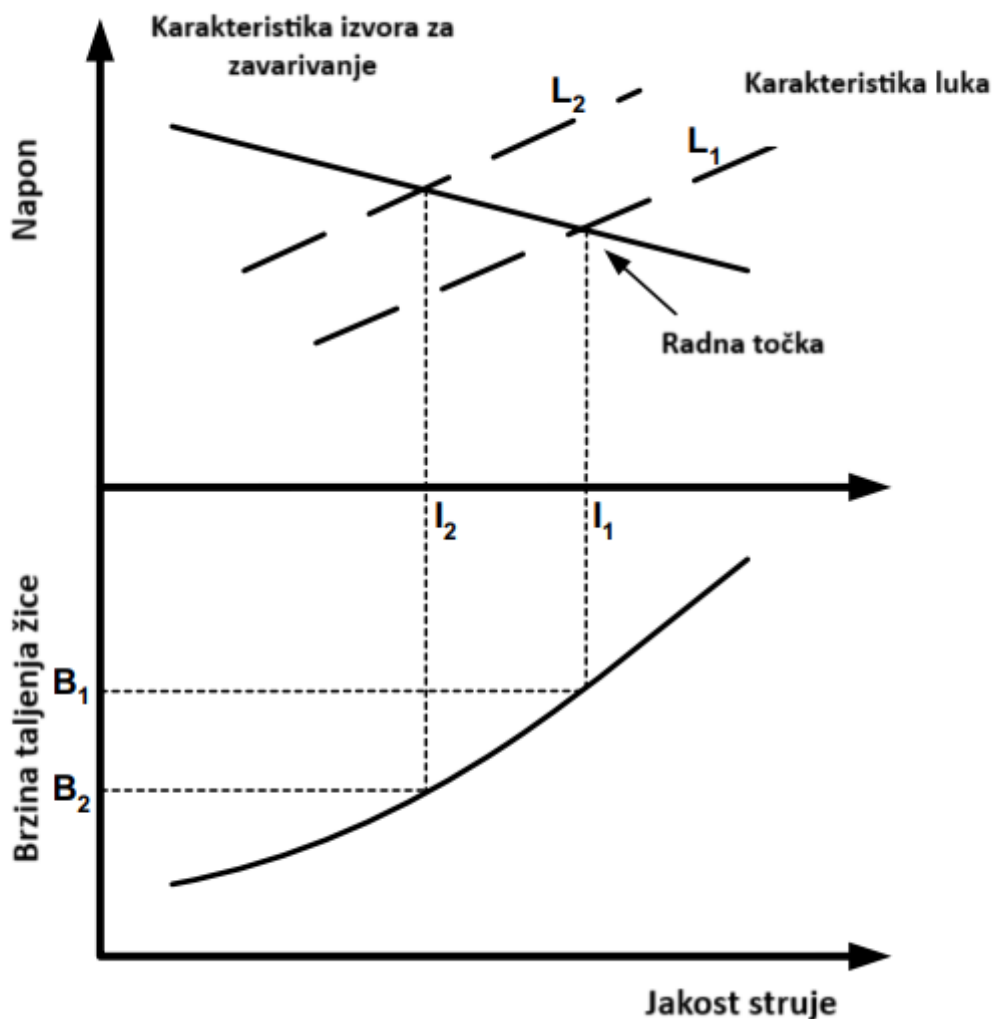
Osnovna oprema za konvencionalni MIG/MAG postupak zavarivanja sastoji se od pištolja za zavarivanje i polikabela, jedinice za dobavu žice, izvora struje za zavarivanje i spremnika zašitnog plina, kako je prikazano na slici 15. Kod dugotrajnog zavarivanja s velikom strujom zavarivanja koristi se još i sustav vodenog hlađenja pištolja za zavarivanje.



Slika 15. Komponente sustava za MIG/MAG zavarivanje [13]

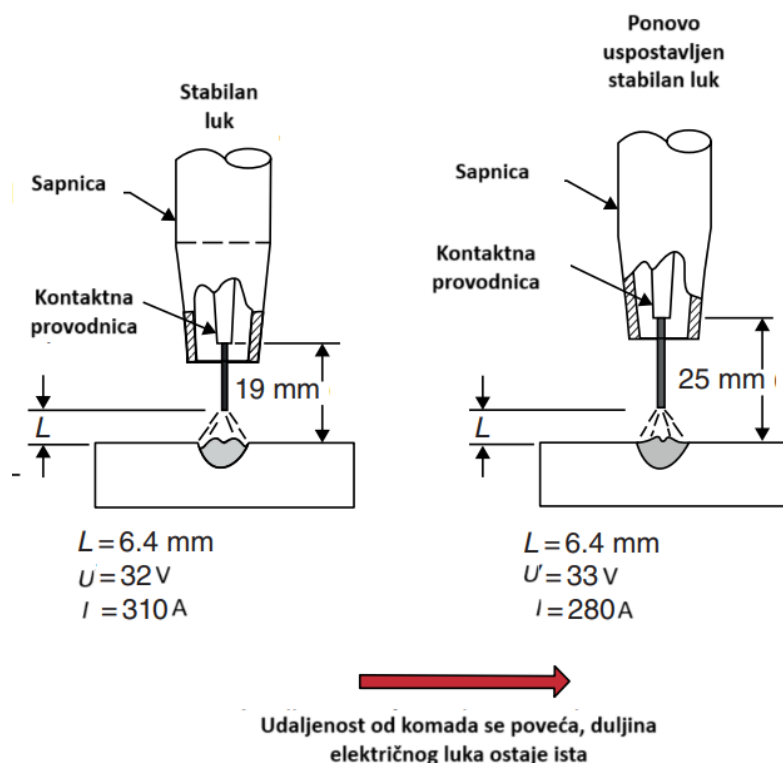
2.2.1. Izvor struje za zavarivanje

Najčešće su izvori struje za zavarivanje za MIG/MAG postupke zavarivanja inverterskog tipa s izlazom konstantnog napona. Karakteristika konstantnog napona je statička karakteristika izvora, a prikazuje ovisnost napona na stezaljkama o opterećenju, tj. struji koju daje izvor [4]. Izvor struje za zavarivanje konstantnog napona uz pomoć konstante dobave žice osigurava unutarnju regulaciju i stabilizaciju duljine električnog luka. Tako se kompenziraju promjene udaljenosti pištolja za zavarivanje od radnog komada koje se uglavnom javljaju tijekom ručnog zavarivanja. U izvoru struje s približno konstantnom karakteristikom napona svaka promjena duljine luka kompenzira se pomoću struje zavarivanja i posljedično taljenjem elektrode [6].



Slika 16. Mehanizam unutarnje regulacije električnog luka kod izvora struje za zavarivanje s karakteristikom konstantnog napona [3]

Slika 16 prikazuje učinak povećanja duljine luka od L_1 do L_2 , što odgovara povećanju udaljenosti pištolja za zavarivanje od radnog komada. Takvo povećanje duljine luka posljedično dovodi do povećanja napona u luku i smanjenju struje zavarivanja i brzine taljenja žice. Budući da brzina žice ostaje konstantna, a smanjuje se brzina taljenja žice, uređaj registrira promjenu napona i reagira brzom promjenom struje kao što je naznačeno na statičkoj karakteristici. Naknadne brze promjene struje uzrokuju brze promjene brzine taljenja žice, čime se podešava duljina luka sve dok se napon luka ne izjednači s narinutim. Takav proces naziva se unutarnja regulacija električnog luka i prikazan je na slici 17.



Slika 17. Prikaz unutarnje regulacije visine električnog luka [5]

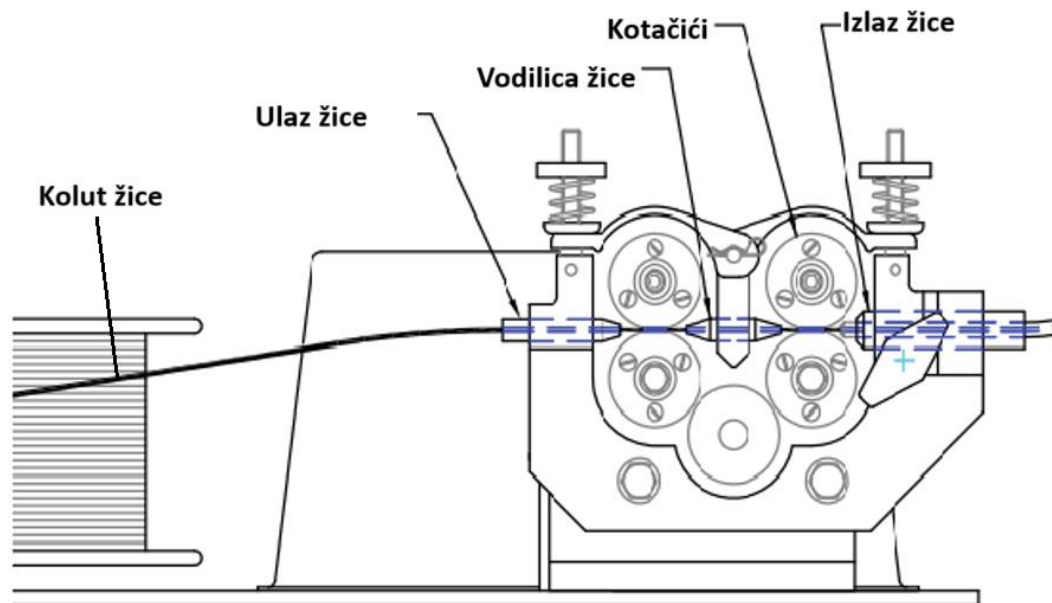
Osim toga, kontrolom nagiba statičke karakteristike izvora i induktivitetom definira se struja kratkog spoja i dinamika procesa prijenosa metala u električnom luku pri prijenosu kratkim spojevima [6]. Induktivitet uveden u izlazni krug smanjuje brzinu porasta struje tijekom kratkog spoja, smanjujući tako rizik od rasprskavanja metalne kapljice. U slučaju debljih žica, koje pokazuju malu varijaciju brzina taljenja u ovisnosti o struji, ili za materijale koji imaju visoku vodljivost, kao što je aluminij, kontrola procesa postiže se upotrebom jedinice za dodavanje žice promjenjive brzine koja reagira na promjene duljine luka podešavanjem brzine dodavanja žice. Moderni izvori struje za zavarivanje,

poznati kao sinergijski sustavi, automatski prilagođavaju napon luka u skladu s promjenama brzine dodavanja žice kako bi održali konstantnu duljinu luka [5].

Inverterska tehnologija se također koristi za generiranje impulsne struje, obično između 100 i 200 impulsa u sekundi, koja je modificirana verzija istosmjerne struje kako bi se povećala kontrola nad električnim lukom i dobio prilagođeniji i bolji način prijenosa metala kontroliranim stvaranjem topline. Inverteri s impulsnom strujom mogu kontrolirati brzinu taljenja putem modulacije oblika pulsa i frekvencije pulsa, budući da procesom upravlja mikroprocesor [5].

2.2.2. Uređaj za dobavu žice

Jedinica za dobavu žice i izvor struje za zavarivanje općenito su integrirani u istom kućištu. Jedinica za dovod žice izvlači elektrodu iz namota i dovodi je do pištolja za zavarivanje. Ova jedinica je sastavljena od izmjeničnog motora, koji mijenja brzinu dobave žice u velikom rasponu, dva para kotačića s vijkom za podešavanje pritiska i vodilicama koje ravnaju i vode žicu. Shema sustava za dobavu žice prikazana je na slici 18.



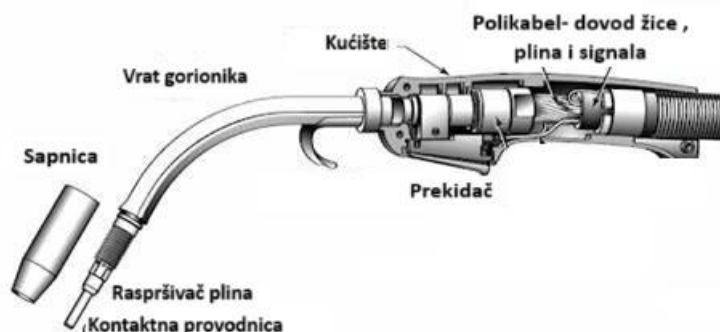
Slika 18. Shema sustava za dobavu žice kod MIG/MAG uređaja [15]

Rebrasti kotačići služe za praškom punjene žice, kotačići s urezom oblika V koriste se za tvrde materijale žice poput čelika, dok se U oblik ureza koristi za mekše žice poput aluminijskih. Za meke žice ili kablove dulje od pet metara mogu se koristiti i *push-pull* sustavi. Ovi sustavi se sastoje od dvije dovodne jedinice, jedne koja je blizu namota žice koji gura elektrodu, a druga jedinica je u

pištolju za zavarivanje i ona povlači elektrodu. Kod automatskih i robotiziranih sustava za zavarivanje, elektroda dolazi u obliku namota (15-18 kg) ili velikog bubnja (200-475 kg) kako bi se smanjilo učestalo mijenjanje žice [6].

2.2.3. Pištolj za zavarivanje

Pištolj za MIG/MAG zavarivanje omogućava precizno vođenje i kontrolu zavarivačkog procesa, osiguravajući kvalitetne zavare. Pištolj za MIG/MAG zavarivanje, prikazan na slici 19., sastoji se od nekoliko osnovnih komponenti: plinske sapnice, kontaktne vodilice, crijeva za plin i žicu, te sustava hlađenja, koje može biti zračno ili vodeno.



Slika 19. Dijelovi pištolja za MIG/MAG zavarivanje [16]

Struja se preko kontaktne vodilice prenosi na žicu. Sapnica osigurava pravilno formiranje oblika strujanja zaštitnog plina. Zračno hlađeni pištolji koriste prirodnu konvekciju zraka za hlađenje i pogodni su za zavarivanje s nižim strujama. S druge strane, vodeno hlađeni pištolji koriste cirkulaciju vode za hlađenje, omogućavajući zavarivanje s visokim strujama i duže radne intervale bez pregrijavanja [6].

2.3. Osnovni parametri MIG/MAG postupka zavarivanja

Parametri postupka kod MIG/MAG zavarivanja značajno utječu na kvalitetu, učinkovitost i karakteristike zavara kao što su pojava rasprskavanja, geometrija zavara, način prijenosa materijala i stabilnost električnog luka. Glavni parametri procesa su struja, napon, brzina zavarivanja, brzina dodavanja žice, promjer elektrode za zavarivanje i duljina slobodnog kraja žice. Parametri su međusobno zavisni. Postupak zahtijeva određeni odnos struje zavarivanja i napona, a oni ovise o izlaznim karakteristikama izvora za zavarivanje.

2.3.1. Napon zavarivanja

Kao što je ranije spomenuto, napon je varijabla koja je važna za uspostavljanje stabilnog luka i izravno je povezana s duljinom luka. Parametar napona utječe na unos topline u zavareni spoj. Povećanje napona rezultira većim unosom topline, što dovodi do dubljeg prodiranja i šireg zavara [5]. Međutim, previsok napon može uzrokovati rasprskavanje i nestabilnost u električnom luku. Naponi luka obično ne variraju značajno nakon što se postignu uvjeti za stabilan luk. Uobičajeni raspon napona kod MIG/MAG postupka je od 13 do 35 V ovisno o promjeru korištene elektrode. Na napon još utječu i slobodan kraj žice, vrsta i protok zaštitnog plina i duljina luka [6].

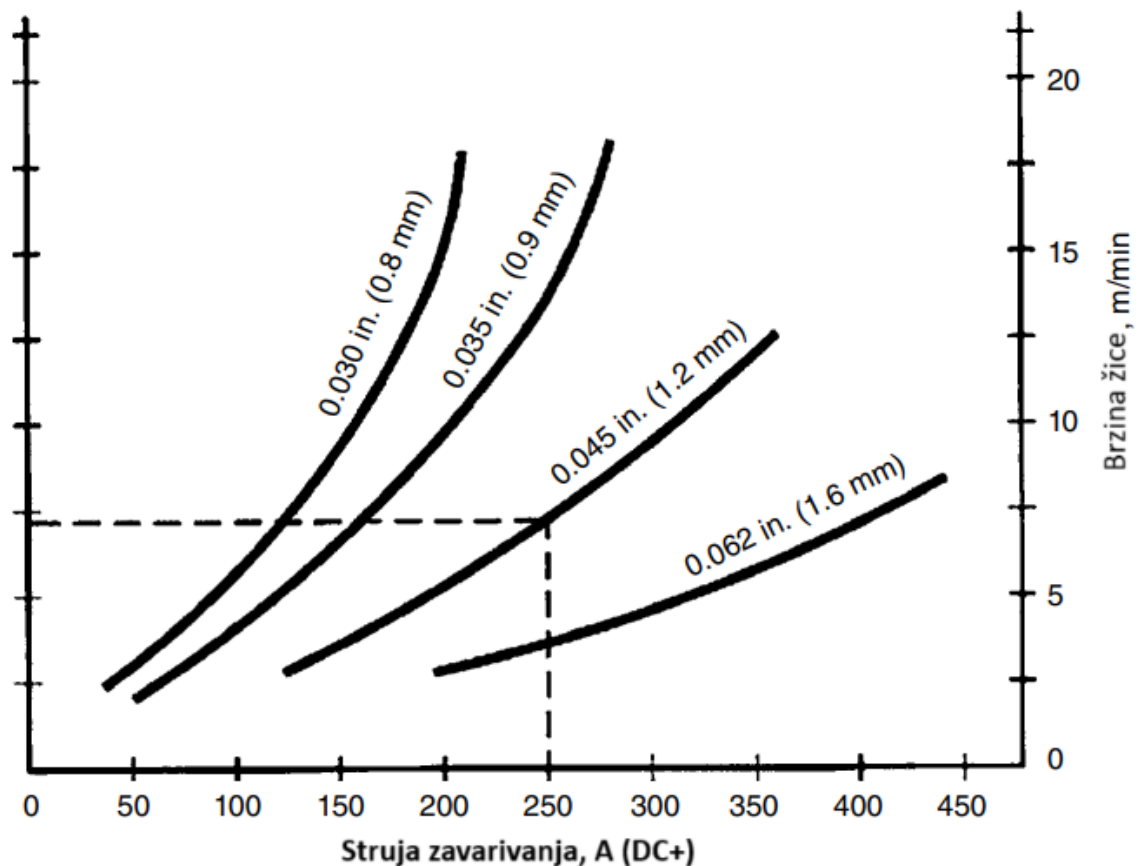
2.3.2. Struja zavarivanja

Struja zavarivanja određuje količinu topline koja se stvara u luku i služi kao glavni parametar za upravljanje brzine taljenja žice. Više razine struje dovode do razvijanja veće topline na žici, što ubrzava taljenje žice i unosi više topline u radni komad. Rezultat je veća količina taline i dublja penetraciju samog zavara. Niže razine struje rezultiraju manjom količinom taline i smanjenom penetracijom. Odgovarajuća razina struje odabire se na temelju debljine materijala i konfiguracije spojeva. Uobičajeni raspon struje kod MIG/MAG zavarivanja kreće se od 50 do 460 A, ovisno o promjeru žice za zavarivanje [6].

2.3.3. Brzina dodavanja žice

Brzina dodavanja žice podešava se na uređaju za dodavanje žice, čime se definira struja zavarivanja, odnosno brzina taljenja žice. Povećanje brzine dodavanja žice povećava brzinu taljenja žice i depozit rastaljenog metala, a također uzrokuje porast struje za zavarivanje, jer se brzina taljenja žice mora uskladiti s povećanom brzinom dodavanja žice. Ova promjena struje s promjenom brzine dodavanja žice povezana je s procesom samoregulacije duljine luka kod MIG/MAG postupka zavarivanja. Budući da proces samoregulacije duljine luka nije savršen, obično je potrebna mala prilagodba napona luka kako bi se održala optimalna duljina luka prilikom promjene brzine dodavanja žice. Tipične brzine dodavanja žice kreću se između četiri i 11 metara po minuti [5].

Iznos struje potreban za određenu brzinu dodavanja žice ovisi o promjeru žice, kao što je prikazano na slici 20. Pri određenoj brzini dodavanja žice, žice većeg promjera zahtijevaju veće struje nego žice manjeg promjera kako bi se postigla jednaka brzina taljenja.



Slika 20. Ovisnost struje zavarivanja o brzini dodavanja žice za različite promjere elektroda [2]

Pri nižim iznosima struje, odnos između struje i brzine dodavanja žice je gotovo linearan. Međutim, pri višim iznosima struje, povećanja brzine dodavanja žice zahtijevaju manja povećanja struje, osobito kod žica manjeg promjera. To se događa jer otporno zagrijavanje slobodnog kraja žice značajno utječe na brzinu taljenja elektrode. Važnost duljine slobodnog kraja žice leži u činjenici da dulji slobodni kraj žice dovodi do povećanog otpornog zagrijavanja žice. Ovaj učinak postaje značajan pri visokim strujama i/ili dugim slobodnim krajevima žice, uzrokujući da se veći dio energije iz izvora struje za zavarivanje troši na zagrijavanje žice, a manji na generiranje topline električnog luka. Pošto je razvijena toplina u električnom vodiču razmjerna s kvadratom jakosti električne struje, porastom razine struje potrebno je manje dodatne struje za postizanje željene brzine taljenja kako bi se održao napon luka i duljina luka pri zadanoj brzini dodavanja žice. Ovaj je učinak izraženiji kod žica manjeg promjera zbog većih gustoća struje [2].

2.3.4. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja odnosi se na brzinu kojom se električni luk pomiče u odnosu na radni komad. Početno povećanje brzine zavarivanja može uzrokovati povećanje penetracije zbog izravnijeg djelovanja električnog luka na radni komad, ali se daljnjim povećanjem brzine zavarivanja smanjuje penetracija i omogućuje nastanak zajeda zbog nedovoljne količine dodatnog materijala za ispunjavanje šupljina koje su nastale zbog električnog luka [6]. Jednadžba toplinskog unosa, jed. (1), jasno pokazuje da brzina zavarivanja, slično kao i struja, izravno utječe na količinu unesene topline po jedinici duljine zavara. Veće brzine zavarivanja rezultiraju manjim toplinskim unosom po jedinici duljine i manjom količinom deponiranog metala. Brzina zavarivanja je neovisna o struji i naponu te se može kontrolirati ručno ili mehanički. Tipične brzine zavarivanja kreću se između 10 i 300 centimetara po minuti [5].

Slobodni kraj žice odnosi se na duljinu žice koja se proteže izvan kontaktne provodnice sve do radnog komada. Utječe na električne karakteristike luka i količinu topline koja se prenosi na spoj. Ispravan nagib pištolja ključan je za održavanje stabilnog luka i postizanje odgovarajuće penetracije i kvalitete zavarenog spoja. Slobodni kraj žice utječe na geometriju zavarenog spoja. Ako je vrijednost slobodnog kraja žice velika, lice zavara je šire, ima veće nadvišenje te manju penetraciju. Slobodni kraj žice kreće se u rasponu od 5 do 15 mm za zavarivanje kratkim spojevima, a za štrcajući i mješoviti luk iznosi do 25 mm [6].

Stanje i priprema spoja za zavarivanje također utječu na proces zavarivanja. Faktori poput oblika spoja, priprema i čistoća materijala mogu utjecati na kvalitetu zavara, penetraciju i ukupnu čvrstoću zavarenog spoja.

Učinci ovih parametara za zavarivanje su međusobno povezani, a pronalaženje optimalne kombinacije zahtijeva vještinu, iskustvo i poznavanje materijala koji se zavaruju. Pravilno podešavanje ovih parametara omogućuje optimizaciju postupka zavarivanja i postizanje visokokvalitetnih zavara.

3. WISETHIN MODIFICIRANI MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

WiseThin modificirani MAG postupak, koji je razvio proizvođač opreme za zavarivanje Kemppi, posebno je osmišljen za zavarivanje tankih limova. Uključuje naprednu tehnologiju za prevladavanje poteškoća povezanih sa zavarivanjem tankih materijala, kao što su rasprskavanje, deformacija materijala i pregorijevanje. Postupak WiseThin optimizira parametre zavarivanja kako bi se osigurao kontrolirani unos topline, minimalne deformacije i poboljšana kvaliteta zavarivanja. WiseThin je modificirani MIG/MAG postupak zavarivanja oznake 131, 133, 135 ili 138 prema standardu EN ISO 4063 [17].

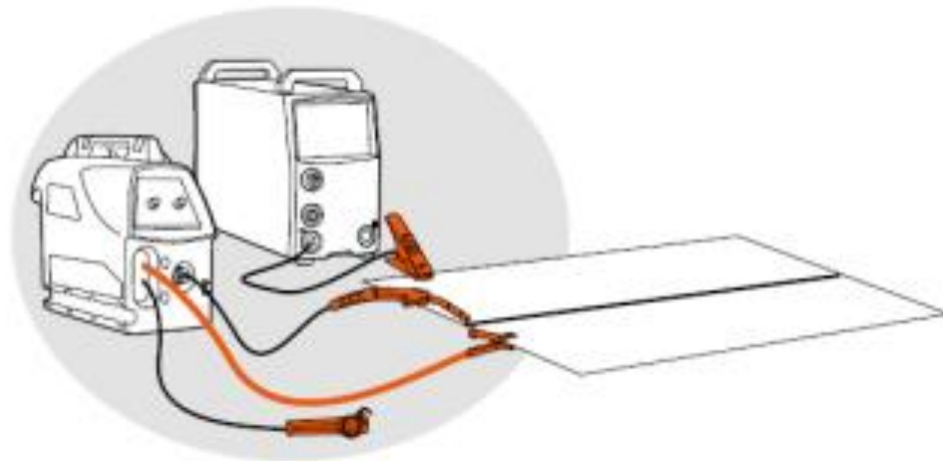
WiseThin modificirani MAG postupak koristi preciznu kontrolu parametara zavarivanja i to napona luka, brzine dodavanja žice i brzine protoka zaštitnog plina. Time se omogućuje smanjeni unos topline i poboljšana kontrola taline. Postupak karakterizira stabilna uspostava električnog luka, smanjeno rasprskavanje i kontrolirana penetracija. Kemppi oprema za zavarivanje sadrži sustave za nadzor i kontrolu, koji služe za dobivanje povratnih informacija i prilagodbu u stvarnom vremenu tijekom procesa zavarivanja [17].

WiseThin modificirani MAG postupak koristi se u industrijama koje zahtijevaju visokokvalitetno zavarivanje tankih metalnih limova, kao što su automobilska, zrakoplovna i elektronička industrija. Obično se koristi za zavarivanje elemenata karoserije automobila, elektroničkih kućišta i drugih komponenti koje zahtijevaju preciznost. Prednosti postupka WiseThin uključuju poboljšanu kvalitetu zavara s minimalnim rasprskavanjem, smanjenje deformacija i povećanu produktivnost. Postupak omogućuje veće brzine zavarivanja, kraće vrijeme proizvodnog ciklusa i poboljšanu učinkovitost kod zavarivanja tankih limova [17].

3.1. Opis postupka

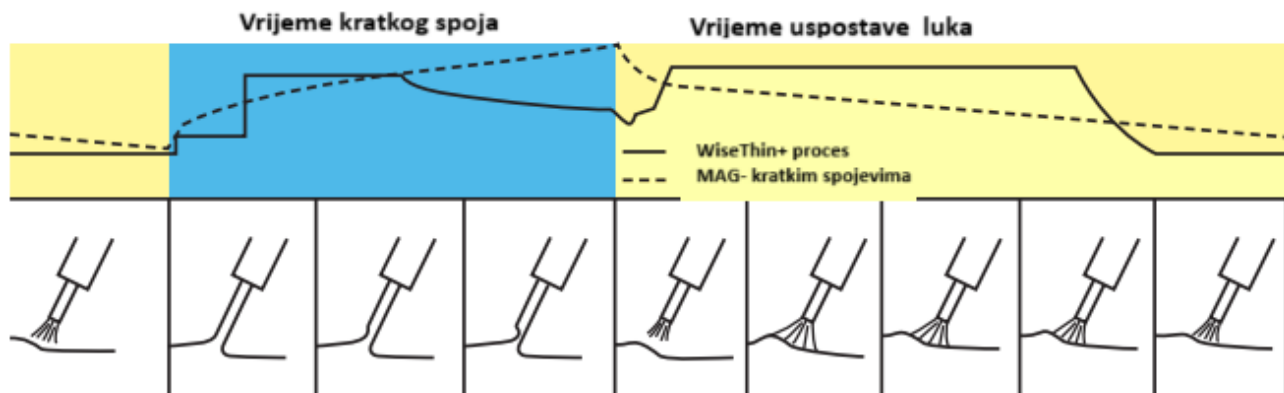
WiseThin postupak uključuje vrlo precizno mjerenje napona izvora struje za zavarivanje u stvarnom vremenu pomoću povratnog kabela prikazanog na slici 21, što služi kao ulaz za kontrolu napona luka. Kada izvor struje za zavarivanje prepozna kratki spoj, povećanje struje potiče prijenos kapljice dodatnog materijala. Kada izmjereni napon dođe do odgovarajuće razine, struja se smanjuje prije nego što kapljica dodatnog metala padne u talinu i kratki spoj završi. Kratki spoj završava na točki niske

struje što rezultira glatkim prijenosom dodatnog materijala bez rasprskavanja. Nakon što se kratki spoj prekine, stvara se impuls struje koji zagrijava talinu, ali ne uzrokuje prijenos dodatnog materijala.



Slika 21. Povratni kabel za mjerenje napona kod zavarivanja WiseThin procesom [17]

Usporedba modificiranog WiseThin i konvencionalnog MAG postupka prijenosom kratkim spojevima prikazana je na slici 22. i objašnjena je tablicom 4.



Slika 22. Usporedba modificiranog MAG procesa WiseThin s konvencionalnim MAG prijenosom metala kratkim spojevima [17]

Tablica 4. Usporedba tijeka procesa WiseThin i konvencionalnog MAG postupka [17]

WiseThin modificirani MAG postupak zavarivanja	Konvencionalni MAG postupak zavarivanja
Za vrijeme kratkog spoja	
Dodatni materijal dodiruje radni komad i nastaje kratki spoj	Dodatni materijal dodiruje radni komad i nastaje kratki spoj
Struja zavarivanja raste i tali vrh žice stvarajući kapljicu „pinch“ efektom	Struja zavarivanja raste do „pinch“ efekta
Proces smanjuje struju prije otkidanja kapljice	
Kapljica rastaljenog metala se otkida i pada u talinu zavara	Kapljica rastaljenog metala se otkida i pada u talinu zavara
Vrijeme uspostave luka	
Ponovna uspostava luka pri niskim razinama struje	Ponovna uspostava luka pri visokim razinama struje
Taljenje žice i osnovnog materijala	Taljenje žice i osnovnog materijala
Kontrolirana snaga luka formira talinu zavara	Kontrolirana snaga luka formira talinu zavara
Brzo vraćanje struje na razinu osnovne struje	Sporo vraćanje struje na osnovnu razinu struje

Prema navodima proizvođača [17], prednosti korištenja WiseThin postupka su:

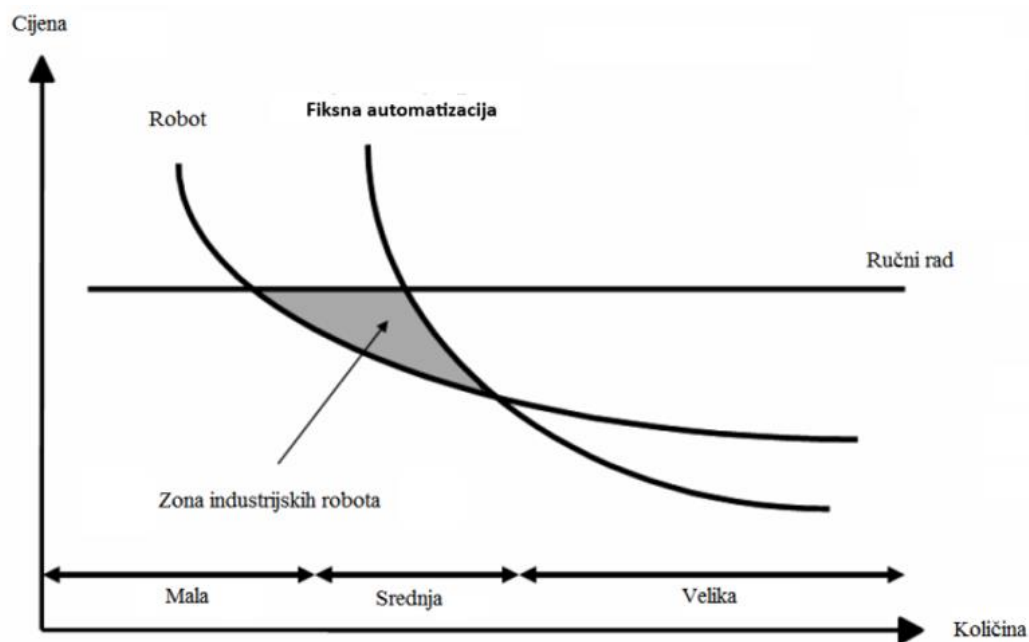
- do 20 % brže zavarivanje u odnosu na konvencionalan MAG postupak zavarivanja kratkim spojevima
- visokokvalitetni zavari i smanjena potreba za obradom nakon zavarivanja
- do 25 % manje unosa topline i deformacija
- smanjenje količine i veličine rasprskanih kapljica metala,
- smanjeni troškovi zavarivanja zbog mogućnosti upotrebe čistog CO₂ kao zaštitnog plina
- mogućnost zavarivanja vertikalno prema dolje i u svim ostalim položajima
- proširuje raspon parametara i time smanjuje potrebu za korištenjem žica manjih promjera.

4. INDUSTRIJSKI ROBOTI

Najčešće se pod pojmom robot misli na industrijski robot, koji se još naziva robotski manipulator ili robotska ruka [18]. Robot, odnosno robotska ruka sastoji se od lanca krutih članaka koji su međusobno povezani pokretljivim zglobovima. Tako se kod robota s rotacijskim zglobovima može uočiti sličnost s građom ljudske ruke, pa se takvi roboti nazivaju artikulirane robotske ruke. Pojedini članci takvih robota odgovaraju ljudskoj nadlaktici i podlaktici, a zglobovi ramenu, laktu i ručnom zglobu. Na kraju robotske ruke nalazi se završni mehanizam, koji se još naziva alat ili šaka robota [18].

Internacionalna federacija za robotiku, IFR, definiciju termina *industrijski robot* temelji na definiciji Međunarodne organizacije za standardizaciju: „*Industrijski robot je automatski kontrolirani, reprogramabilni manipulator s višestrukom svrhom, programabilan u tri ili više osi, koji može biti fiksiran na mjestu ili pričvršćen na mobilnu platformu za upotrebu u automatizacijskim aplikacijama u industrijskom okruženju*“ [19].

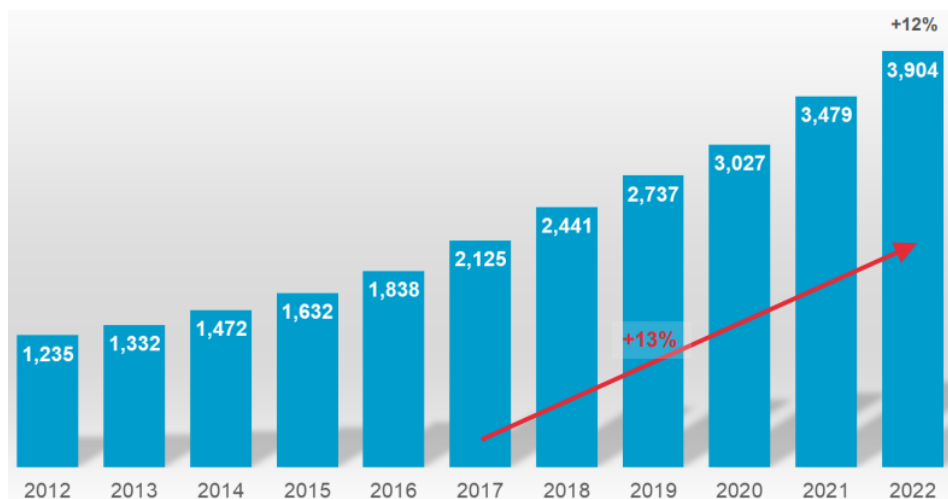
Današnji tržišni uvjeti uglavnom odgovaraju proizvodnim pogonima koji se bave malim i srednjim serijama zbog visoke konkurencije i dinamične prirode tržišta. U takvim okolnostima, robotski vođena proizvodnja nudi najbolji omjer troškova po jedinici proizvoda u usporedbi s ručnom proizvodnjom i proizvodnjom pomoću fiksno automatiziranih sustava, kao što je prikazano na slici 23.



Slika 23. Zona industrijskih robota [20]

Fiksnom automatizacijom smatraju se sustavi koji se periodički modificiraju i takve sustave odlikuje visoka učinkovitost, ali i ograničena fleksibilnost. Industrijski roboti se smatraju ključem konkurentne proizvodnje jer omogućuju kombinaciju visoke produktivnosti, kvalitete i fleksibilnosti uz minimalne troškove. S vremenom roboti postaju sve sofisticiraniji i jeftiniji te sve pristupačniji i za manje serije proizvoda.

Prema izvještaju World Robotics za 2022. godinu, prodano je oko 4 milijuna jedinica industrijskih robota, što predstavlja rast od 12 % u odnosu na 2021 godinu, kako je prikazano na slici 24. Najveći porast upotrebe robota zabilježen je u automobilskoj industriji, a slijedi je industrija elektronike [21]. Prema primijeni najviše je jedinica u sustavima manipulacije materijalom, a nakon toga slijedi primjena u zavarivanju. Što se tiče država, Kina ekstremno brzo raste i godišnje instalira više od 50 % od ukupno instaliranih robota na razini svijeta.



Slika 24. Količina instaliranih jedinica industrijskih robota u svijetu, u tisućama komada [21]

Prema podacima IFR-a za 2022. godinu, u SAD se većina industrijskih robota koristi za rukovanje materijalom (48 %) i zavarivanje (15 %). Često se primjenjuju za bojanje, strojnu obradu i sastavljanje mehaničkih i elektroničkih dijelova, a sve se više koriste za pakiranje i paletizaciju proizvoda, kontrolu i testiranje, sortiranje, označavanje i transport.

Robotima se postavljaju različiti zahtjevi ovisno o načinu i mjestu njihove primjene. Industrijski roboti koji obavljaju zadatke posluživanja moraju imati veliku preciznost (točnost pozicioniranja). Kod robota za bojanje tolika točnost nije potrebna. Pri točkastom zavarivanju traži se određena preciznost pozicioniranja, a pri elektrolučnom zavarivanju tom se zahtjevu dodaje točnost trajektorije (putanje i brzine) gibanja. Za industrijske robote koji se koriste pri montaži bitna je točnost pozicioniranja, a pri

tome mora postojati sustav za prepoznavanje oblika jer su predmeti najčešće različitog oblika i položaja [20].

4.1. Podjela industrijskih robota

Robot se obično sastoji od većeg broja članaka i zglobova, koji su međusobno povezani zupčanicima, lancima, remenima i/ili vijcima. Roboti se dijele prema načinu upravljanja, vrsti pogona zglobova i geometriji radnog prostora [22].

4.1.1. Vrste pogona zglobova



Osnovna podjela robota temelji se na izvoru energije koja se koristi za pokretanje zglobova robota. Najčešće korištene tehnologije pogona robota su električni i hidraulički pogon. Većina robotskih manipulatora danas koristi električne pogone u obliku DC servomotora ili DC koračnog motora. Međutim za manipulaciju ekstremno teških dijelova, kao što je rukovanje karoserijom automobila, preferiraju se roboti s hidrauličkim pogonom. Jedan ozbiljan nedostatak robota s hidrauličkim pogonom je njihova sklonost kontaminaciji uljem i drugim nečistoćama, što može biti kritično za mnoge aplikacije u montaži koje zahtijevaju visoku razinu čistoće.

I roboti s električnim pogonom i roboti s hidrauličkim pogonom često koriste pneumatske alate ili efektore, posebno kada je jedina potrebna radnja hvatanje jednostavnog tipa. Važna karakteristika alata pokretanih zrakom je ta što pokazuju ugrađenu fleksibilnost pri hvatanju objekata, budući da je zrak stlačivi fluid. Ovo je u suprotnosti s krutim mehaničkim hvataljkama bez senzora, koje lako mogu oštetiti osjetljiv objekt zbog prevelike pritisne sile [22].

4.1.2. Geometrija radnog prostora

Efektor robota ili alat robotskog manipulatora obično je montiran na prirubnicu ili ploču pričvršćenu za zapešće robota. Bruto radni prostor robota definiran je kao skup točaka u trodimenzionalnom prostoru koje zapešće može doseći. Osi prva tri zglobova robota nazivaju se glavnim osima. Grubo govoreći, glavne osi se koriste za određivanje položaja krajnjeg izvršitelja. Osi preostalih zglobova, manje osi, koriste se za utvrđivanje orijentacije alata. Kao posljedica toga, geometrija radnog prostora određuje se uglavnom prema glavnim osima, dok manje osi pružaju dodatnu fleksibilnost pri radu. Postoji šest tipova zglobova robota, ali kod industrijskih robota najčešće se koriste samo dva osnovna tipa zgloba, koja su prikazana u tablici 5.

Tablica 5. Tipovi zglobova industrijskih robota [22]

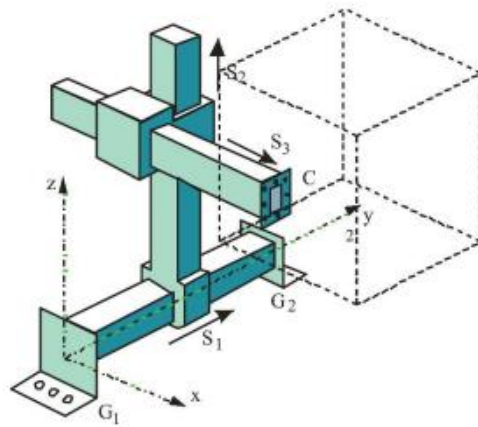
Tip zgloba	Oznaka	Simbol	Opis
Rotacijski	R		Rotacijsko gibanje oko osi
Translacijski	T		Linearno gibanje duž osi

Zglobovi koji omogućuju rotacijsko kretanje oko osi nazivaju se rotacijski zglobovi (R) te su to najčešći tipovi zglobova. Sljedeći najčešći tip su translacijski zglobovi (T), koji omogućuju klizno ili linearno kretanje duž osi. Specifična kombinacija rotacijskih i translacijskih zglobova za tri glavne osi određuje geometriju radnog prostora robota, kako je prikazano u tablici 6. Popis u tablici 6 nije iscrpan, jer postoji mnogo mogućnosti, ali je reprezentativan za većinu komercijalno dostupnih industrijskih robota. Što se tiče analize kretanja ruke, prizmatični zglobovi su obično jednostavniji od rotacijskih zglobova. Stoga je zadnji stupac u tablici 6, koji specificira ukupni broj rotacijskih zglobova za tri glavne osi, grub pokazatelj složenosti ruke [22].

Tablica 6. Geometrija radnog prostora robota prema glavnim osima [22]

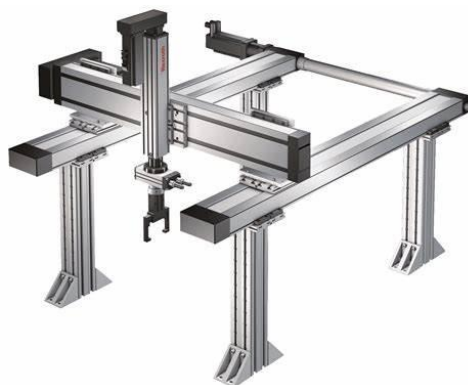
Tip robota	Prva os	Druga os	Treća os	Ukupni broj rotacijskih zglobova
Kartezijski	P	P	T	0
Cilindrični	R	P	T	1
Sferni	R	R	T	2
SCARA	R	R	T	2
Artikulirani	R	R	R	3

Za najjednostavnijeg robota prikazanog u tablici 6, sve tri glavne osi su translacijske te je rezultirajuća notacija za ovu konfiguraciju TTT, a prikazana je na slici 25.



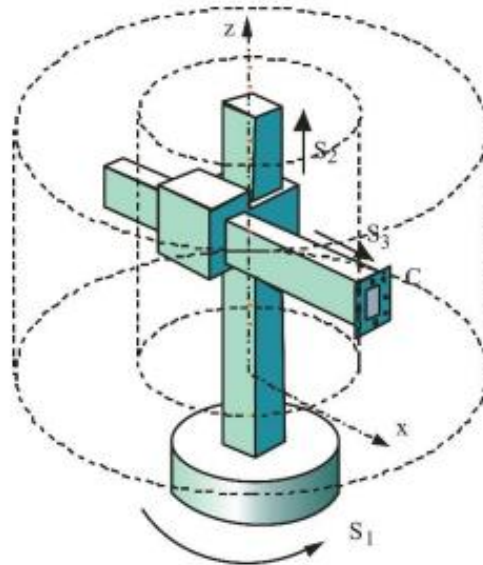
Slika 25. Kinematska struktura kartezijskog robota [23]

Takva karakteristika kartezijskog robota još se naziva i pravokutno-koordinatni robot. To je matematički najjednostavniji sustav što se tiče translacijskih kretanja. Lako je izračunati koja su kretanja zglobova potrebna za premještanje tereta s jednog mjesta na drugo, a pokret ruke ne utječe na orijentaciju tereta. Ovo je prednost kada se radi u sustavu pravokutne geometrije, kao na primjer umetanje komponenti u tiskane pločice. Roboti za ovu svrhu često vise s portala te se takvi nazivaju gantry roboti, a primjer gantry robota prikazan je na slici 26. Budući da su klizne vodilice poduprte na oba kraja, gantry robot je lako učiniti krutim i najkrutiji je od uobičajenih struktura za industrijske robote [24].



Slika 26. Primjer gantry robota [25]

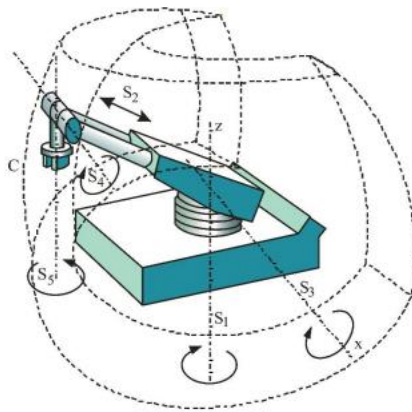
Ako se prvi zglob kartezijskog koordinatnog robota zamijeni rotacijskim zglobom kako bi se formirala konfiguracija RTT, dobiva se cilindrični koordinatni robot. Primjer cilindričnog koordinatnog robota prikazan je na slici 27.



Slika 27. Kinematska struktura i radni prostor cilindričnog tipa robota [23]

Rotacijski zglob pomiče ruku naprijed-nazad oko vertikalne baze robota. Translacijski zglobovi zatim pomiču zapešće gore-dolje duž vertikalne osi i unutra-van duž radijalne osi. Budući da će postojati neka minimalna radijalna pozicija, radni prostor generiran ovom konfiguracijom zgloba je volumen između dvije vertikalne koncentrične cilindrične površine. Takav radni prostor čini ovu konfiguraciju robota prikladnom u primjenama rukovanja materijalom, kao što je sklapanje električnog motora. Njegova prednost u odnosu na kartezijski tip robota je ta što cilindrični tip robota može biti okružen strojevima koje opslužuje i može se rotirati oko svoje osi kako bi pokrio veće radno područje [24].

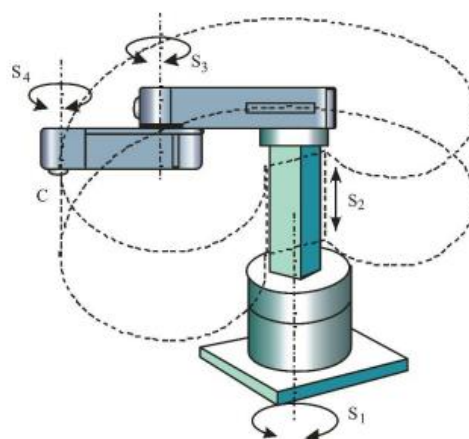
Ako se drugi zglob cilindričnog koordinatnog robota zamijeni rotacijskim zglobom tako da konfiguracija postane RRT, dobiva se sferni koordinatni robot. Primjer sfernog koordinatnog robota prikazan je na slici 28.



Slika 28. Kinematska struktura i radni prostor sfernog tipa robota [23]

Ovdje prvi rotacijski zglob pomiče ruku naprijed-nazad oko vertikalne baze, dok drugi rotacijski zglob podiže i spušta ruku oko horizontalne osi ramena. Translacijski zglob pomiče zapešće radijalno unutra i van. Radni prostor generiran u ovom slučaju je volumen između dviju koncentričnih sfera. Sfere su obično skraćene odozgo, odozdo i odostraga zbog ograničenja raspona kretanja zglobova. Sferna konfiguracija robota je bila usvojena kod prvog industrijskog robota *Unimate* [24], a najčešće se koristi kod utovara industrijskih strojeva jer je prikladan za dugi pravolinijski doseg unutar preše ili stroja za kalupljenje [24].

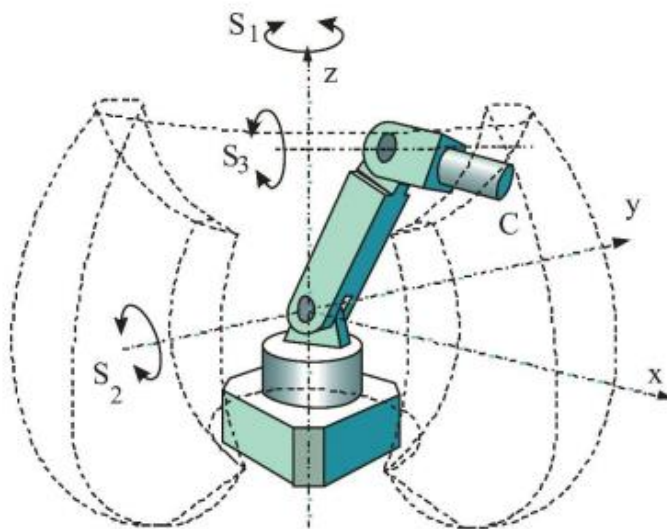
Poput sfernog koordinatnog robota, SCARA robot (eng. *Selective Compliance Assembly Robot Arm*) također ima dva rotacijska zgloba i jedan translacijski zglob (u konfiguraciji RRT) za pozicioniranje zapešća. Međutim, kod SCARA robota sve tri osi zglobova su vertikalne, kao što je prikazano na slici 29.



Slika 29. Kinematska struktura i radni prostor SCARA robota [23]

Prvi rotacijski zglob pomiče ruku naprijed-nazad oko osnovne osi koja se također može smatrati vertikalnom osi ramena. Drugi rotacijski zglob pomiče podlakticu naprijed-nazad oko vertikalne osi lakta. Tako dva rotacijska zgloba kontroliraju pokret u horizontalnoj ravnini. Vertikalnu komponentu pokreta osigurava treći translacijski zglob koji pomiče zapešće gore-dolje. Oblik horizontalnog presjeka radnog prostora SCARA robota može biti prilično složen, ovisno o ograničenjima raspona kretanja prva dva zgloba. SCARA se često koristi za montažu, slično kao cilindrične i kartezijske ruke i to iz istih razloga. Kompaktnija je od cilindričnog robota [24].

Kada se posljednji preostali translacijski zglob zamijeni rotacijskim zglobom kako bi se postigla konfiguracija RRR, dobiva se artikulirani koordinatni robot. Artikulirani koordinatni robot ima najviše antropomorfnu konfiguraciju, tj. najviše nalikuje anatomiji ljudske ruke. Artikulirani roboti se također nazivaju rotacijski roboti. Primjer artikuliranog koordinatnog robota prikazan je na slici 30.



Slika 30. Kinematska struktura i radni prostor artikuliranog tipa robota [23]

Ovdje prvi rotacijski zglob pomiče ruku naprijed-nazad oko vertikalne baze robota. Drugi rotacijski zglob pomiče ruku gore-dolje oko horizontalne osi ramena, a treći zglob pomiče podlakticu gore-dolje oko horizontalne osi lakta. Ovi pokreti stvaraju složeni radni prostor, pri čemu je presjek iz bočnog pogleda obično u obliku polumjeseca [24].

4.1.3. Načini upravljanja robotom

Još jedan temeljni kriterij klasifikacije je metoda koja se koristi za kontrolu kretanja efektora ili alata. Dvije osnovne vrste gibanja navedene su u tablici 7.

Tablica 7. Načini upravljanja robota i njihove primjene [22]

Način upravljanja robota	Primjene
Od točke do točke	Točkasto zavarivanje, Rukovanje materijalom
Kontinuiranom putanjom	Bojanje, Elektrolučno zavarivanje, Lijepljenje

Prva vrsta je gibanje od točke do točke, gdje se alat pomiče na niz diskretnih točaka u radnom prostoru. Korisnik ne kontrolira putanju između točaka eksplicitno, a također ni brzinu i ubrzanje, iako su u praksi na neki način ograničeni jer aktuatori imaju maksimalnu moguću provedbenu brzinu. Rezultat je da se svaka os ruke giba gotovo konstantnom brzinom između programiranih točaka. Takva ruka je očito neprikladna za zadatke koji zahtijevaju kontrolu brzine. Gibanje od točke do točke korisno je za operacije koje su diskretne prirode. Na primjer, točkasto zavarivanje je primjena za koju je gibanje od točke do točke sve što je potrebno.

Druga vrsta gibanja je gibanje po kontinuiranoj putanji, ponekad nazvano kontrolirano gibanje po putanji. Ovdje krajnji vrh alata mora slijediti propisanu putanju u trodimenzionalnom prostoru, a brzina gibanja duž putanje može varirati i jasno je da to predstavlja složeniji problem kontrole. To zahtijeva ne samo servo kontrolu brzine svakog zgloba, već i da se nekoliko zglobova kreće istovremeno na koordiniran način. Primjeri primjena za robote s kontrolom gibanja po kontinuiranoj putanji uključuju bojanje, elektrolučno zavarivanje i primjenu ljepila ili brtvila [22].

Određeni termini, poput "od točke do točke", koriste se kako u ovom kontekstu, tako i u kontekstu učenja robota. Robot koji je kontinuirane putanje iz perspektive načina upravljanja može se podučavati na način "od točke do točke" [22].

4.3. Karakteristike robota

Iako vrste pogona, geometrije radnog prostora i metode upravljanja gibanjem pružaju prikladne načine za širu klasifikaciju robota, postoji niz dodatnih karakteristika koje omogućuju detaljniji opis industrijskih robota. Neke od češćih karakteristika navedene su u tablici 8.

Tablica 8. Karakteristike robota [23]

Karakteristika robota	Mjerna jedinica
Broj osi	-
Nosivost	kg
Maksimalna brzina	mm/sec
Doseg i hod	mm
Orijentacija alata	°
Ponovljivost	mm
Preciznost i točnost	mm

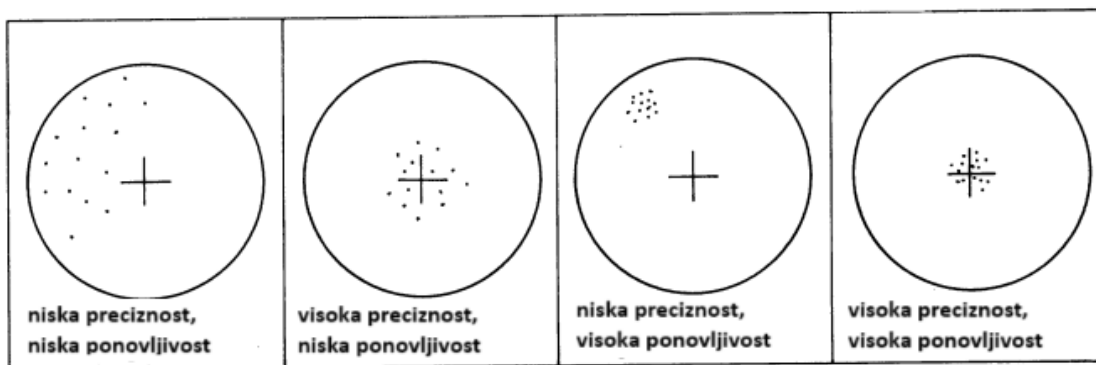
Roboti imaju različit broj osi koje omogućuju rotaciju ili translaciju zglobova kako je već ranije objašnjeno. Obično, prve tri osi, koje se nazivaju glavne osi, koriste se za pozicioniranje zapešća robota, dok se preostale osi koriste za određivanje orijentacije alata ili hvataljke. Šest-osni artikulirani robot, koji može pomicati alat ili ruku u bilo koji položaj i orijentaciju unutar radnog prostora, smatra se općim manipulatorom zbog svoje fleksibilnosti u trodimenzionalnom prostoru. Industrijski roboti obično imaju između četiri i šest osi, iako mogu imati i više. Dodatne osi, poznate kao redundantne osi, korisne su za izbjegavanje prepreka i prilagodbu geometrijskim zahtjevima konfiguracije robota [23].

Nosivost robota može biti u rasponu od dva kilograma do nekoliko tisuća kilograma. Također i maksimalna brzina vrha alata može biti u rasponu od 50 mm/sec do nekoliko tisuća mm/sec. Pošto se nosivost robota i maksimalna brzina mogu razlikovati za nekoliko redova veličine, pri odabiru robota

najbitnija je kombinacija tih karakteristika za određenu primjenu. U nekim slučajevima, velika nosivost možda nije potrebna, dok je u drugim slučajevima točnost važnija od brzine [22].

Doseg i hod robota ključni su pokazatelji veličine radnog prostora. Kod artikuliranog tipa robota hod je jednak dosegu robota, iz tog se razloga moraju koristiti zaštitne mjere kod programiranja kako bi se spriječilo da robot udari sam sebe ili radnu površinu. Kod ostalih tipova konfiguracije industrijskih robota najčešće je hod manji od dosega [22].

Ponovljivost mjeri sposobnost robota da ponovo postavi vrh alata u istu točku više puta. Zazor u zupčanicima i krutost strukture mogu utjecati na ponovljivost, ali dobro konstruiran robotski manipulator može imati ponovljivost unutar malih tolerancija. Ponovljivost mjeri koliko se postignute pozicije grupiraju oko svoje srednje vrijednosti. Razlika između točnosti i ponovljivosti prikazana je na slici 31. Ponovljivost je često važnija od točnosti jer, pod uvjetom da je greška točnosti konstantna, ona se može kompenzirati [24].



Slika 31. Razlika između preciznosti i ponovljivosti [24]

Točnost robota pri postavljanju tereta na određenu poziciju i zadržavanju na toj poziciji ili pri prolasku kroz određenu točku tijekom gibanja, može biti vrlo važna. Zbog složenosti mjerenja točnosti tijekom kretanja, točnost se obično definira za statički slučaj, kada robot dođe do ciljne točke i drži teret u fiksnom položaju. Mjerenje točnosti za statički slučaj se postiže pomoću servo upravljanja (osim kod *pick-and-place* robota) i uvijek postoji pomak i nasumična greška zbog toga što servomehanizmi nikada nisu savršeni. Ovo vrijedi za svaku os, a veličina greške neće biti jednaka za sve osi. Ako se navodi samo jedna vrijednost za maksimalnu dopuštenu pozicijsku grešku za sve osi robota, to bi trebala biti najgora situacija, no točnost u određenim osima može biti mnogo bolja. Točnost također ovisi o geometriji i opterećenju u trenutku mjerenja jer se segmenti robota savijaju pod velikim opterećenjem, a povećana inercija može utjecati na servomehanizme. Geometrija utječe na točnost jer

se često kontrolira kut zgloba pa kada je ruka ispružena, pozicijska greška je veća. Budući da su prizmatični zglobovi obično čvršći od rotacijskih, najprecizniji manipulatori su kartezijski, oni s kombinacijom prizmatičnih i rotacijskih zglobova su srednje preciznosti, a artikulirani roboti su najmanje precizni. Postoji i mogući kompromis između točnosti i brzine ako se servomehanizmu omogućiti više vremena za stabilizaciju na zadanu poziciju. Postiže se veća točnost, ali na račun smanjenja brzine [24].

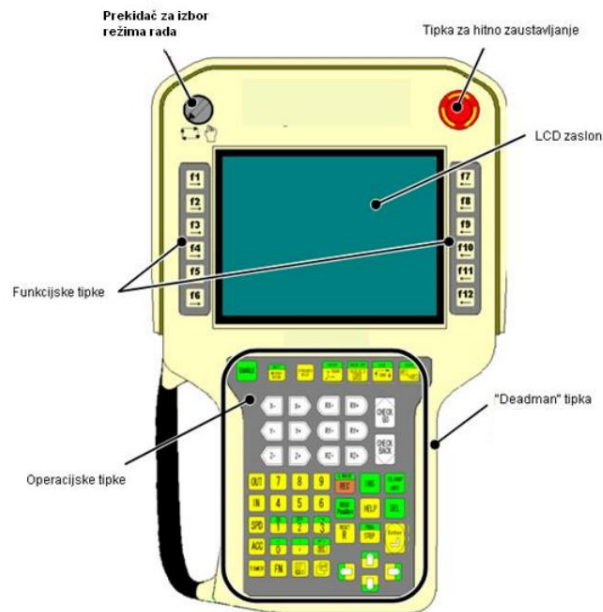
4.4. Metode programiranja robota

Programiranje je ključni aspekt svakog robotskog sustava kojim se prenose informacije industrijskom robotu za obavljanje specifičnih zadataka. Nekada se je programiranje robota smatralo „zastrašujućim“ jer je zahtijevalo pisanje kompleksnih linija koda. Napredak u robotici doveo je do razvoja intuitivnijih metoda programiranja koje su jednostavne za korištenje čak i za neiskusne operatore. Metode programiranja industrijskih robota dijele se na online, offline i mješovito programiranje [23].

4.4.1. Online metode programiranja

Metode online programiranja uključuju zaustavljanje industrijskog robota, isključivanje robota iz proizvodnje i postavljanje u način rada za programiranje. Programi se tada kreiraju i modificiraju upravljanjem industrijskim robotom. Glavne metode u kategoriji online programiranja su programiranje putem privjeska za učenje i vođenje putem demonstracije [23].

Pomoću privjeska za učenje, prikazanog na slici 32, pomiču se zglobovi robota i pištolj za zavarivanje se dovodi u željeni položaj i ta se točka pohranjuje u memoriju. Kada se unesu barem dvije točke na željenoj putanji, računalni sustav robota interpolira gibanje između tih točaka na odabrani način, a robot reproducira to gibanje pri odabranoj brzini. Nakon završetka programiranja, definiranu putanju je moguće koristiti za provođenje procesa.



Slika 32. Privjesak za učenje ili „teach pendant“ [26]

Pri vođenju robota demonstracijom programer izvodi potrebne pokrete vlastitom rukom, dok drži uređaj za snimanje putanje, prikazan na slici 33. Taj uređaj može biti sam manipulator ili replika ruke, "glavna ruka" ili "podučavajuća ruka", koja je geometrijski slična robotu, ali dovoljno lagana za jednostavno pomicanje, nema napajanje i ima senzore za kut ili pomak na svojim zglobovima, slične onima na robotu. Signali iz ovih senzora se snimaju i postaju programom koji robot reproducira.



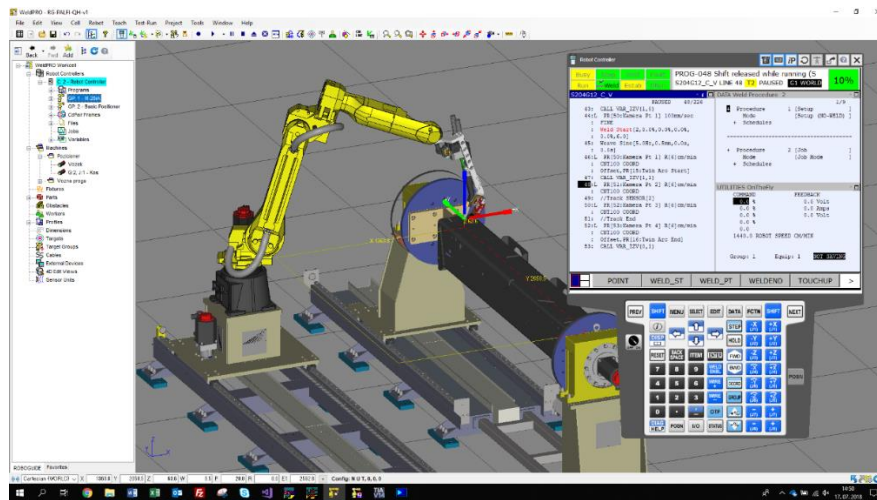
Slika 33. Uređaj za snimanje putanje [27]

Budući da se pozicije zglobova kontinuirano snimaju, ova metoda se može koristiti za robote s kontinuiranom putanjom i često se koristi za namjene poput bojanja, gdje su pokreti složeni i kontinuirani. Robot koji se kreće od točke do točke također se može podučavati vođenjem, pri čemu

se pozicije zglobova snimaju samo u trenucima kada programer pritisne gumb. U posljednje vrijeme pojava kolaborativnih robota sve više je popularizirala ovaj način programiranja [23].

4.4.2. Offline metode programiranja

Offline programiranje robota eliminira potrebu za fizičkim gibanjem robota kako bi se izradio program. Umjesto toga, programiranje se odvija u virtualnom okruženju, gdje programeri mogu izrađivati programe i putanje izravno na temelju CAD modela radnog komada. Offline programiranje robota podrazumijeva korištenje računalnih softvera za izradu robotskog aplikacijskog programa izvan proizvodnog okruženja, prikazanog na slici 34. Offline programiranje robota često se zamjenjuje i koristi naizmjenično sa softverom za offline simulaciju gibanja robota, iako to dvoje nije isto. Offline simulacija podrazumijeva testiranje robotskog programa izvan proizvodnog okruženja i može se koristiti zajedno s offline programiranjem. U računalnim programima poput ROBOGUIDE, RobotStudio i RoboDK može se testirati program putem offline simulacije koja stvara virtualni prikaz robota i njegovog radnog okruženja prije nego što se učita u upravljačku jedinicu robota [23].



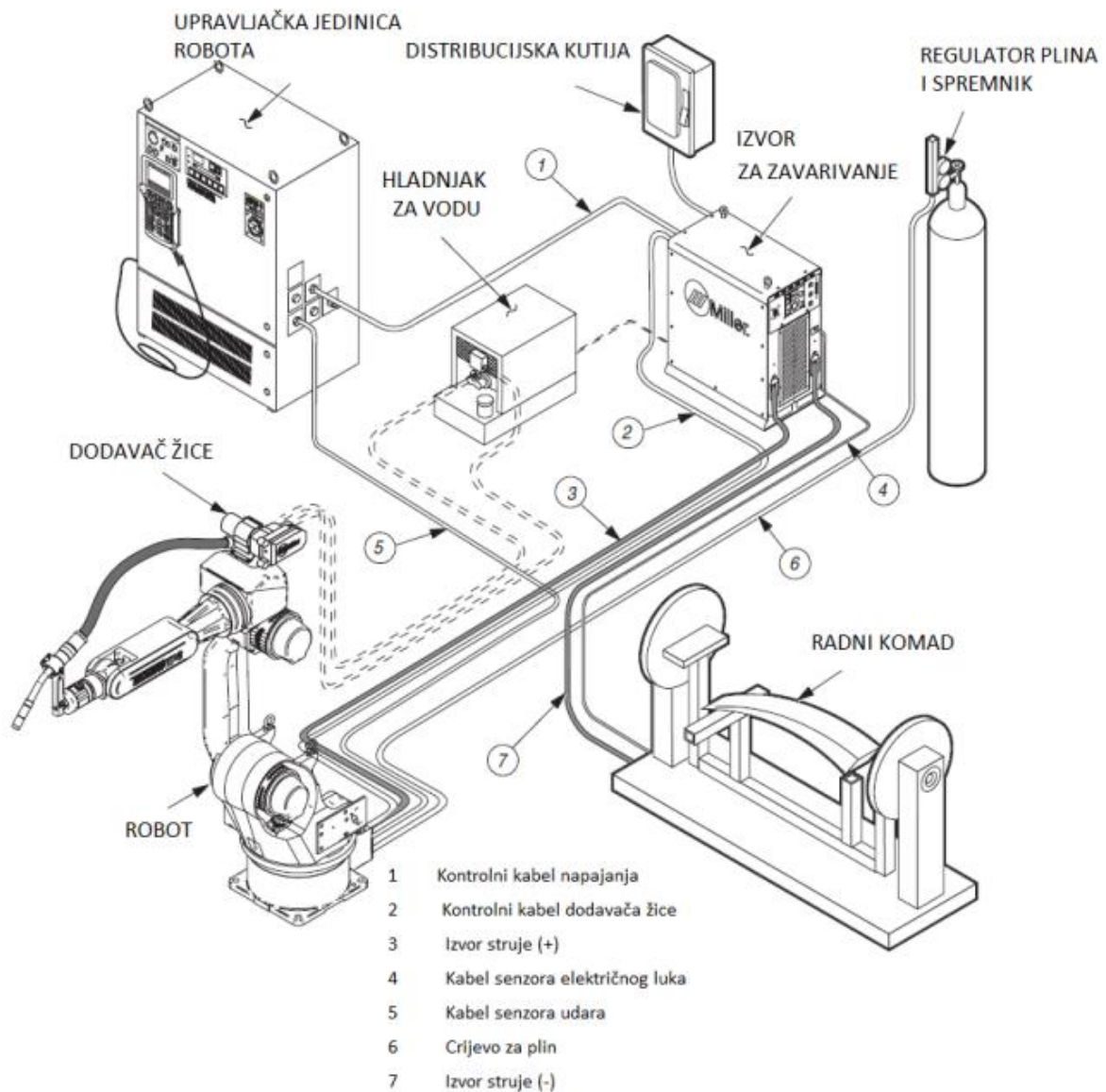
Slika 34. Program za simulaciju i programiranje robota ROBOGUIDE tvrtke FANUC [28]

Ova metoda nudi nekoliko prednosti, uključujući mogućnost optimizacije putanja robota, simulaciju gibanja robota i smanjenje vremena za koje je robot izvan pogona. Offline programiranje je posebno korisno za složene primjene koje zahtijevaju precizne pokrete robota i planiranje putanja robota.

Mješovito programiranje kombinira ove dvije metode. Program se može pripremiti offline programiranjem koristeći simulacije, a zatim se prilagodbe i podešavanje vrše online u stvarnom okruženju.

5. EKSPERIMENTALNI POSTAV

U eksperimentalnom dijelu, postav za usporedbu MAG postupka s WiseThin modificiranim MAG postupkom zavarivanja sastoji se od robota proizvođača FANUC i opreme za zavarivanje proizvođača Kemppi. Primjer robotiziranog sustava za zavarivanje prikazan je na slici 35. Eksperimentalni dio rada proveden je u tvrtki Cromatec d.o.o. Zavarivanje je provedeno na robotskoj stanici, dok je analiza zavarenih uzoraka provedena u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

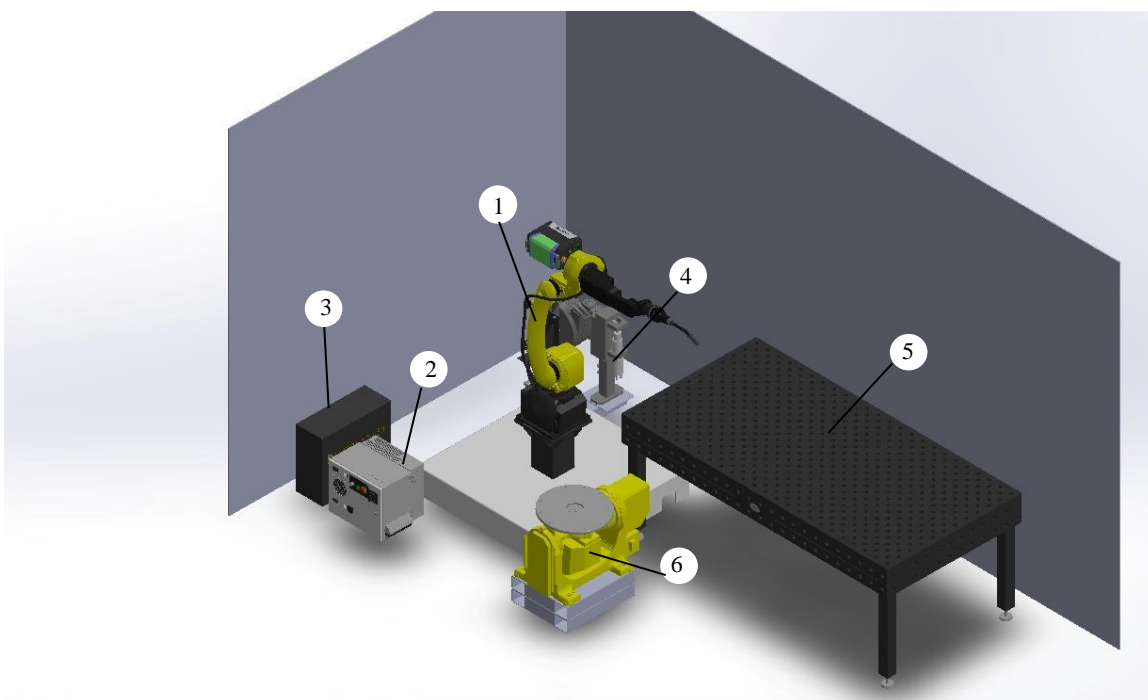


Slika 35. Primjer robotske stanice za zavarivanje [29]

Postavljanje sustava uključuje nekoliko ključnih koraka koji osiguravaju točno i pouzdano prikupljanje podataka za komparativnu analizu.

5.1. Konfiguracija robotske stanice

Na slici 36. prikazana je 3D konfiguracija robotske stanice Cromatec u računalnom programu *SolidWorks*. Položaj svih komponenti stanice određen je tako da se programiranje i zavarivanje izvrše što jednostavnije i u najkraćem mogućem roku i da robot može postići maksimalni doseg bez nailaženja na prepreku.



Slika 36. 3D model robotske zavarivačke stanice

Zavarivačka robotska stanica na kojoj je proveden eksperimentalni dio rada sastoji se od:

1. robota za zavarivanje FANUC ArcMate 100iD
2. upravljačke jedinice
3. izvora struje za zavarivanje Kemppi A7 MIG s pripadajućim hladnjakom
4. stanice za održavanje i čišćenje pištolja za zavarivanje
5. radnog mjesta 1 – zavarivački stol
6. radnog mjesta 2 – dvoosni pozicioner A05B-1220-J201.

Na slici 37 prikazana je navedena zavarivačka robotska stanica u tvrtki Cromatec d.o.o.



Slika 37. Robotska stanica u tvrtki Cromatec d.o.o.

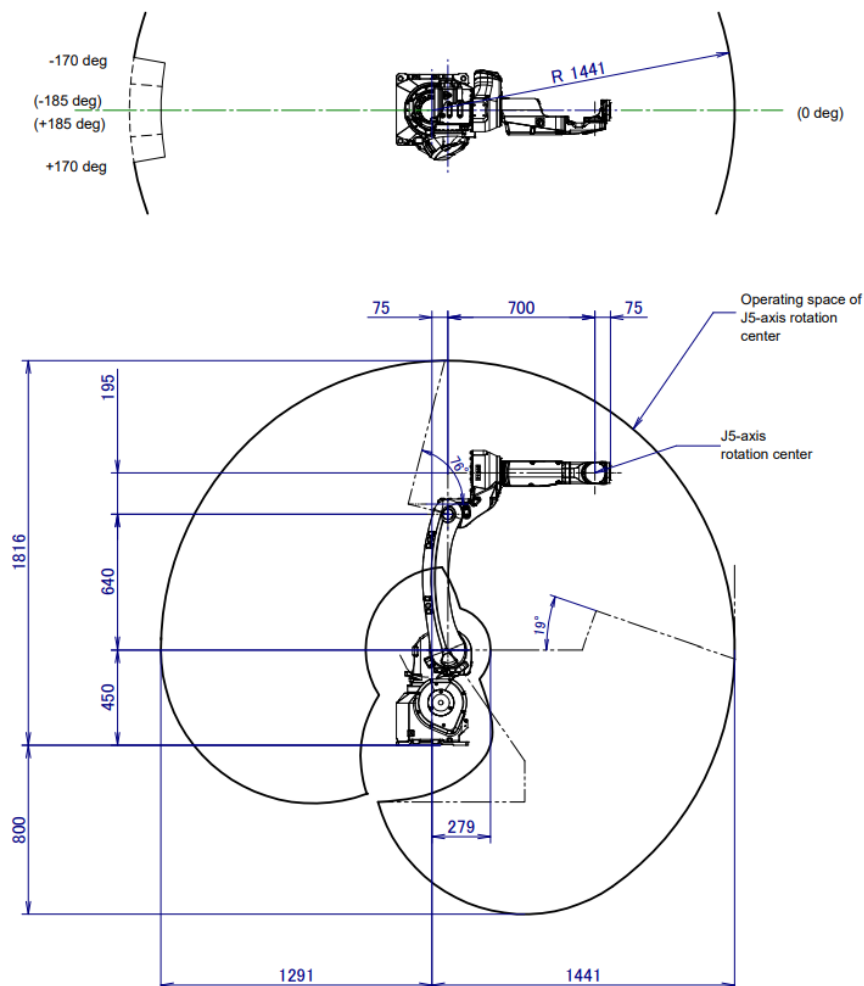
5.2. FANUC ARC Mate 100iD

FANUC ARC Mate 100iD, prikazan na slici 38, je industrijski robot posebno konstruiran za elektrolučno zavarivanje. Proizvod je tvrtke FANUC, vodeće japanske tvrtke u području robotike. ARC Mate 100iD karakteriziraju visoka preciznost, brzina i pouzdanost pri zavarivanju.



Slika 38. ARC Mate 100iD robotska ruka tvrtke FANUC [30]

ARC Mate 100iD ima kompaktnu konstrukciju koja omogućuje jednostavnu integraciju u postojeće proizvodne linije i radna okruženja s ograničenim prostorom. To je artikulirana zglobna ruka sa šest osi. Kinematska struktura sa šest rotacijskih stupnjeva slobode gibanja omogućuje različite položaje zavarivanja pozicioniranjem vrha alata robota i njegove orijentacije. Vrh alata ima maksimalnu nosivost od 12 kg, što je dovoljno za obavljanje zadataka zavarivanja. Doseg robota je 1441 mm, kao što je prikazano na slici 39, što omogućuje rukovanje širokim rasponom veličina radnih komada. Ponovljivost mu je $\pm 0,02$ mm [31].



Slika 39. Radni opseg ARC Mate 100iD robota [31]

ARC Mate 100iD podržava različite postupke elektrolučnog zavarivanja, uključujući elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog/aktivnog plina (MIG/MAG), elektrolučnog zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (TIG) i zavarivanje plazmom. Može se opremiti različitim pištoljima za zavarivanje i dodacima s ciljem prilagođavanja specifičnim zahtjevima zavarivanja [31].

Sigurnost je glavni prioritet u industrijskoj robotici, a ARC Mate 100iD posjeduje nekoliko sigurnosnih značajki kako bi se osiguralo sigurno radno okruženje. To uključuje senzore za detekciju kolizije, prekidače za hitno zaustavljanje (eng. *emergency stop buttons*) i sigurnosne blokade (eng. *safety interlocks*) koje omogućuju siguran rad u prisutnosti ljudi. Tehničke karakteristike odabranog modela robota prikazane su u tablici 9.

Tablica 9. Tehničke karakteristike robota FANUC ArcMate 100iD [31]

Tehničke karakteristike robota FANUC ArcMate 100iD		
Model robota	ArcMate100iD	
Struktura robota	Artikulirana	
Broj osi	6	
Pozicija montaže	Stojeća, viseća, zidna i kutna	
Raspon pokreta	Os 1	$\pm 170^\circ$
	Os 2	$145^\circ / - 90^\circ$
	Os 3	$275^\circ / - 180^\circ$
	Os 4	$\pm 190^\circ$
	Os 5	$\pm 140^\circ$
	Os 6	$\pm 270^\circ$
Maksimalna brzina	Os 1	$260^\circ/s$
	Os 2	$240^\circ/s$
	Os 3	$260^\circ/s$
	Os 4	$430^\circ/s$
	Os 5	$450^\circ/s$
	Os 6	$720^\circ/s$
Maksimalna nosivost	Na zglobu	12 kg
	Na osi 3	12 kg
Dopušteni moment opterećenja na zglobu	Os 4	26 Nm
	Os 5	26 Nm
	Os 6	11 Nm
Dopuštena inercija opterećenja na zglobu	Os 4	$0,90 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
	Os 5	$0,90 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
	Os 6	$0,30 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
Ponovljivost	$\pm 0,02 \text{ mm}$	
Masa	145 kg	
Razina buke	Ispod 70 dB	

5.3. Upravljačka jedinica R-30iB

Upravljačka jedinica R-30iB, prikazana na slici 40, je napredni sustav upravljanja za industrijskog robota FANUC ARC Mate 100iD. Kao "mozak" robotskog sustava, pruža potrebnu „inteligenciju“, mogućnosti programiranja i upravljačke funkcije za rad i optimizaciju performansi robota kod elektrolučnog zavarivanja.



Slika 40. R-30iB upravljačka jedinica s privjeskom za učenje [32]

Kontroler robota sadrži napajanje, upravljačke kontrole, upravljački krug, radnu memoriju za gibanje i komunikaciju s vanjskim uređajima. Upravljačka jedinica robota upravlja operacijama stanice za zavarivanje. Preko nje se izvršavaju naredbe koje se nalaze u radnoj memoriji robota i time se upravlja gibanjem pištolja za zavarivanje i izvorom struje za zavarivanje. Upravljačka jedinica kontrolira položaj i orijentaciju vrha alata, u ovom slučaju pištolja za zavarivanje, koristeći matrice homogenih transformacija u odnosu na glavni nepomični desnokretni koordinatni sustav robota koji se nalazi u sjecištu osi servomotora u bazi robota. Robotom se upravlja preko privjeska za učenje na kojem se nalazi softver *ArcTool*, koji je proizvela tvrtka FANUC posebno za robotizirano zavarivanje. R-30iB kontroler podržava različite opcije povezivanja, što omogućava integraciju s drugim sustavima automatizacije i perifernim uređajima. Omogućuje komunikaciju s vanjskim uređajima kao što su izvori struje za zavarivanje, razni senzori i sigurnosna oprema. Najčešće korišteni protokoli za komunikaciju s vanjskim uređajima su Ethernet/IP, DeviceNet, Profibus, Profinet i ModBus. Njihova dostupnost osigurava učinkovit i sinkroniziran rad tijekom robotiziranog zavarivanja [32].

5.4. Izvor struje za zavarivanje Kemppi A7

Kemppi A7 je izvor struje za zavarivanje koji nudi niz funkcija i mogućnosti za različite primjene zavarivanja. Konstruiran je za izvođenje visokokvalitetnih zavara, izvrsnih karakteristika luka i jednostavan rad, a prikazan je na slici 41.



Slika 41. Kemppi A7 izvor za zavarivanje [33]

Izvor Kemppi A7 podržava više postupaka zavarivanja, uključujući MIG/MAG, TIG i REL. Ova svestranost omogućuje njegovu upotrebu u širokom rasponu primjena i materijala kao što su zavarivanje tankih ili debelih čeličnih limova, nehrđajućih čelika i aluminijskih. Inverterska tehnologija izvora pruža preciznu kontrolu nad strujom i naponom zavarivanja i tako osigurava stabilne karakteristike luka, poboljšanu uspostavu električnog luka i izvrsnu kvalitetu zavara. Uključuje prilagodljive funkcije zavarivanja, kao što su adaptivni luk, popunjavanje kratera i adaptivni korijen, koji automatski prilagođavaju parametre zavarivanja kako bi se održala optimalna stabilnost luka i kvaliteta zavarenih spojeva. Ove funkcije pomažu kompenzirati promjene u postavljanju spojeva, brzini dodavanja žice i drugim čimbenicima, što rezultira dosljednim i visokokvalitetnim zavarima. Tehničke karakteristike izvora struje dane su u tablici 10, a specifikacijska pločica izvora A7 prikazana je na slici 42 [33].

Tablica 10. Tehničke karakteristike izvora struje za zavarivanje Kemppi A7 [33]

Priključni napon	Trofazni napon, 400 V, -15 %...+20 %	
Područje zavarivanja	20 A / 12 V - 450 A / 46 V	
Intermitencija	60 % ED	450 A
	100 % ED	350 A
Maksimalna snaga	22 kVA	
Podržani promjeri elektrode	0,8 – 1,2 mm	
Vanjske dimenzije	610 × 240 × 520 mm	
Masa	42,6 kg	
EMC klasa	A	



Slika 42. Specifikacijska pločica Kemppi A7 MIG 450

Izvor struje za zavarivanje Kemppi A7 nudi razne mogućnosti upravljanja podacima o zavarivanju. Omogućuje pohranjivanje i dohvaćanje parametara zavarivanja i postavki specifičnih za posao, što olakšava ponovno pozivanje i repliciranje parametara zavarivanja. Opremljen opcijama povezivanja, kao što su Ethernet i USB priključci, omogućuje integraciju s perifernim uređajima i sustavima za

upravljanje zavarivanjem. Spajanje na računalo putem Ethernet komunikacije olakšava prijenos podataka, nadzor i daljinsko upravljanje, što može utjecati na povećanje produktivnosti. Sučelje prilagođeno korisniku s jasnom i intuitivnom kontrolnom pločom omogućuje operaterima da jednostavno prate i prilagođavaju postavke za optimalnu izvedbu zavarivanja, a pomoću sustava *Weld assist* parametri zavarivanja se mogu automatski prilagoditi na temelju odabrane vrste materijala, debljine materijala, položaja zavarivanja, promjera žice i mješavine zaštitnih plinova. Zaslone pruža povratne informacije o parametrima zavarivanja, statusu i porukama o pogreškama u stvarnom vremenu [33].

5.5. Hladnjak Kemppi A7

Zadaća hladnjaka A7 je učinkovito odvođenje topline koja se stvara tijekom procesa zavarivanja. Učinkovito upravljanje toplinom pomaže u održavanju optimalne radne temperature opreme za zavarivanje, kao što su izvori struje i pištolj za zavarivanje. Ova kontrola temperature osigurava dosljednu izvedbu zavarivanja, sprječava pregrijavanje i potencijalno oštećenje opreme. Jedna od ključnih prednosti hladnjaka A7, prikazanog na slici 43, je sposobnost produljenja vremena zavarivanja.



Slika 43. Hladnjak Kemppi A7 [33]

Učinkovitim hlađenjem opreme za zavarivanje minimizira se rizik od pregrijavanja i omogućuje duže kontinuirano vrijeme zavarivanja. To rezultira povećanom produktivnošću i smanjenim zastojem, budući da operateri mogu dovršiti više zavora bez prekida radi hlađenja opreme što je naročito bitno kod robotiziranog zavarivanja. Nadalje, hladnjak Kemppi A7 doprinosi poboljšanoj kvaliteti i ujednačenosti geometrije zavora. Održavanje stabilnih temperatura pomaže u sprječavanju varijacija parametara tijekom zavarivanja koje mogu dovesti do grešaka ili nedosljednosti u zavarenim

spojevima. To rezultira poboljšanom kvalitetom zavara, većom produktivnošću i smanjenim zahtjevima za preradom ili popravkom [33].

5.6. Stanica za čišćenje pištolja za zavarivanje

Stanica za čišćenje pištolja za zavarivanje ili TCS (eng. *Torch Cleaning Station*) je dodatna oprema konstruirana za automatizirano čišćenje i održavanje pištolja za zavarivanje koji se koriste pri robotiziranom zavarivanju. Nudi učinkovito i pouzdano rješenje za održavanje pištolja za zavarivanje u optimalnom stanju, osiguravajući dosljednu izvedbu zavarivanja i produžujući životni vijek opreme [34]. TCS se sastoji od raspršivača sredstva protiv prskotina, glodala za čišćenje mlaznice od prskotina i rezača žice, kao što je prikazano na slici 44.



Slika 44. Podsustavi stanice za čišćenje [34]

5.7. Pozicioner

Dvoosni pozicioner za zavarivanje je specijalizirani uređaj koji omogućava precizno postavljanje i rotaciju obradaka oko dvije osi. Njegova glavna funkcija je poboljšanje pristupačnosti zavarivaču ili robotu do svih strana radnog komada, što rezultira poboljšanom kvalitetom zavara i povećanom produktivnošću [36]. Na slici 45 prikazan je dvoosni pozicioner tvrtke FANUC, a specifikacije uređaja navedene su u tablici 11.



Slika 45. Dvoosni pozicioner tvrtke FANUC [35]

Tablica 11. Tehničke karakteristike dvoosnog pozicionera tvrtke FANUC [36]

Model		Pozicioner
Broj osi		2
Pozicija montaže		Stojeća, viseća i zidna
Raspon pokreta	Os 1	$\pm 135^\circ$
	Os 2	$\pm 240^\circ$
Maksimalna brzina	Os 1	120°/s
	Os 2	190°/s
Maksimalna nosivost	500 kg	
Dopušteni moment opterećenja	Os 1	1764 Nm
	Os 2	686 Nm
Dopuštena inercija opterećenja	Os 1	300 kg·m ²
	Os 2	100 kg·m ²
Ponovljivost	$\pm 0,05$ mm	
Masa	295 kg	
Pogon	AC servo motor	

6. INTEGRACIJA ROBOTA I OPREME ZA ZAVARIVANJE

Integracija robota i opreme za zavarivanje kombinira prednosti obje tehnologije za poboljšanje procesa zavarivanja u industrijskim primjenama. Roboti, svojom preciznošću, brzinom i ponovljivošću, pružaju učinkovitu i dosljednu kontrolu pokreta kod zavarivanja, koju ne mogu ostvariti ni vješti zavarivači. S druge strane, oprema za zavarivanje nudi napredne postupke zavarivanja koji optimiziraju kvalitetu i produktivnost samog postupka zavarivanja.

Sposobnost robotske ruke da izvrši zadatke zavarivanja s odgovarajućom preciznošću i ponovljivošću, zajedno s optimiziranim parametrima zavarivanja koje pruža izvor struje za zavarivanje, smanjuje vrijeme proizvodnog ciklusa i povećava ukupni učinak.

Integracija usmjerava postupak zavarivanja automatiziranju ponavljajućih zadataka i smanjenju potrebe za ljudskom intervencijom. Robotska ruka, vođena programiranim uputama izvodi približno jednake zavarene spojeve, minimizirajući mogućnost nastanka pogrešaka i potrebu za naknadnom obradom nakon zavarivanja. Brzo programiranje robota i vrijeme izmjene programa poboljšavaju učinkovitost, omogućujući brži povrat investicije što je bitno i s ekonomske strane.

Automatizacijom procesa zavarivanja, smanjuje se rizik od izlaganja operatera štetnim plinovima i toplini. Robotska ruka upravlja zadacima zavarivanja, omogućujući ljudskim operaterima da se usredotoče na nadzor i praćenje procesa sa sigurne udaljenosti. To poboljšava ukupnu sigurnost na radnom mjestu i pruža ergonomičnije radno okruženje za operatere.

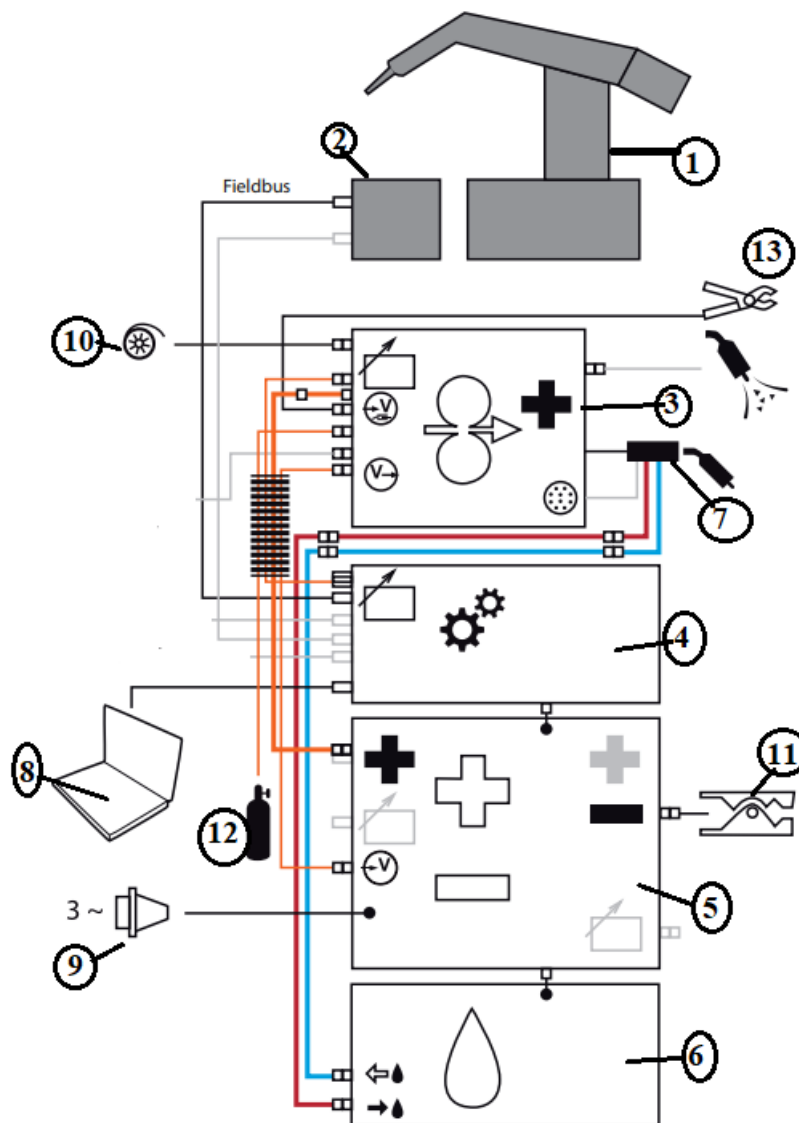
Integracija robota i opreme za zavarivanje omogućuje praćenje i analizu podataka u stvarnom vremenu. Robotska ruka i oprema za zavarivanje mogu prikupljati i prenositi podatke koji se odnose na parametre zavarivanja i pokazatelje kvalitete. Ti se podaci mogu analizirati kako bi se optimizirali postupci zavarivanja i donijele odluke koje mogu pridonijeti poboljšanju kvalitete zavara i/ili proizvoda.

Integracija robota i opreme za zavarivanje može se podijeliti u tri cjeline: povezivanje fizičkih komponenti sustava, konfiguriranje mrežne veze i konfiguriranje sustava u cjelinu [37].

6.1. Povezivanje fizičkih komponenti sustava

Najprije je potrebno sastaviti i spojiti fizičke komponente sustava koji čine izvor struje za zavarivanje, hladnjak, dodavač žice, set kabela za međusobno povezivanje elemenata sustava i pištolj za

robotizirano zavarivanje. Nakon sastavljanja i montiranja komponenti potrebno ih je povezati prema dijagramu povezivanja prikazanom na slici 46.



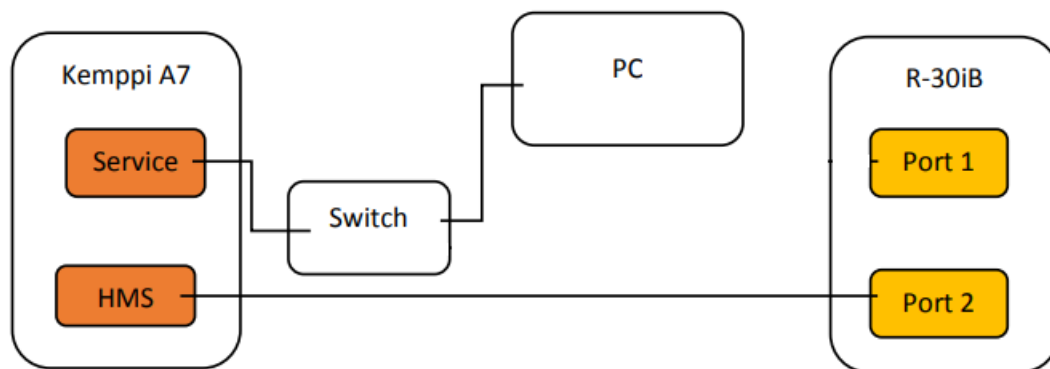
Slika 46. Dijagram povezivanja sustava [37]

Sustav čine sljedeće komponente:

- 1 – robot
- 2 – upravljačka jedinica robota
- 3 – dodavač žice
- 4 – jedinica za robotsko sučelje
- 5 – izvor struje za zavarivanje

- 6 – hladnjak
- 7 – pištolj za zavarivanje
- 8 – osobno računalo
- 9 – kabel za napajanje izvora
- 10 – namot žice
- 11 – masa kabel
- 12 – boca sa zaštitnim plinom
- 13 – kabel za mjerenje napona luka.

Na stražnjoj strani jedinice za robotsko zavarivanje nalazi se utor za spajanje sklopa za komunikaciju koji ima dva priključka za komunikaciju. Sklop koristi EtherNet/IP komunikacijski protokol za ostvarivanje komunikacije između izvora struje za zavarivanje i robota. Ethernet kabelom se sklop povezuje na upravljačku jedinicu robota, a priključak izvora za zavarivanje se povezuje na osobno ili prijenosno računalo prema dijagramu prikazanom na slici 47.



Slika 47. Dijagram spajanja sustava ethernet kablovima za komunikaciju [37]

Priključak 2 na upravljačkoj jedinici robota optimiziran je za Ethernet/IP komunikaciju. Ako LED svjetla na priključcima Ethernet kabela svijetle treptajućim zelenim svjetlom, kabeli su ispravno priključeni [37].

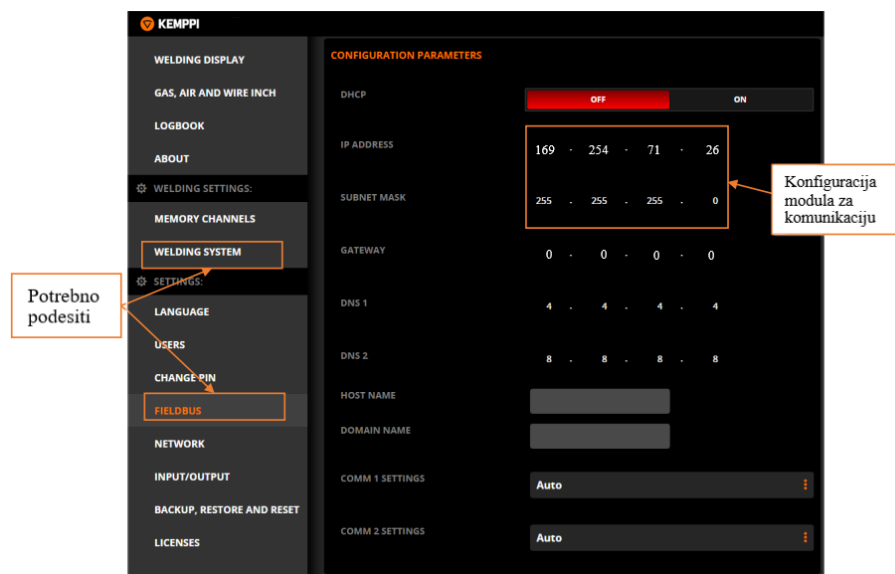
6.2. Konfiguracija mrežne komunikacije

Nakon spajanja komponenti, potrebno je odabrati IP adrese za postavke mrežne komunikacije. Odabrane IP adrese komponenti prikazane su u tablici 12.

Tablica 12. Postavke IP adresa komponenti za postavke mreže.

Komponenta	IP adresa
PC	169.254.71.25
Kemppi A7 servisni priključak	10.0.0.2
Kemppi A7 modul za komunikaciju (HMS)	169.254.71.26
Priključak 2 na upravljačkoj jedinici robota	169.254.71.27

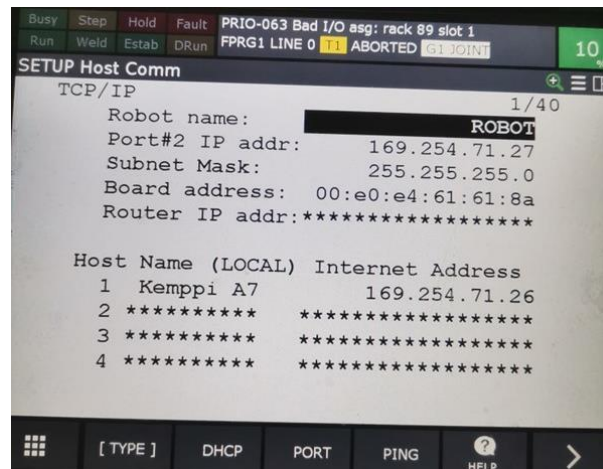
Koristeći upravljački zaslon na izvoru struje za zavarivanje, podešena je IP adresa servisnog priključka prema tablici 12, tako da bude u istoj maski podmreže kao i računalo. U ovom slučaju to je adresa 255.255.255.0. Nakon pravilnog konfiguriranja mrežnih postavki, pristupljeno je mrežnom korisničkom sučelju preko internetskog pretraživača. U adresnu traku upisana je IP adresa servisnog priključka (<http://10.0.0.2>). Time je omogućeno otvaranje mrežnog korisničkog sučelja i mogu se konfigurirati postavke sklopa za komunikaciju kao što je prikazano na slici 48.



Slika 48. Podešavanje sklopa za komunikaciju u mrežnom korisničkom sučelju

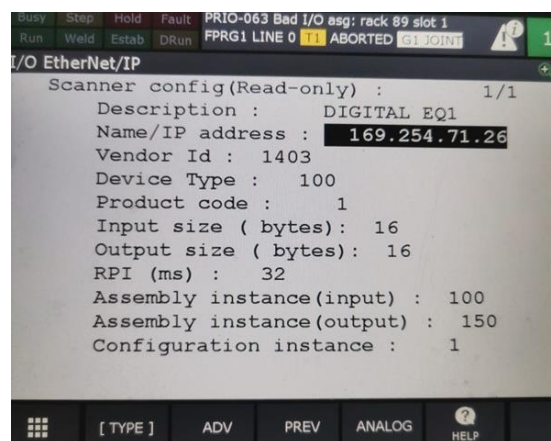
Pod karticom *Welding system* mogu se podesiti postavke plina, senzor dodira žicom ili sapnicom, senzor kolizije i drugi parametri ovisno o postavkama sustava. Ovim postupkom podešen je sklop za komunikaciju koji je spojen Ethernet kabelom s upravljačkom jedinicom.

Kako bi se završilo podešavanje mrežne komunikacije preko Ethernet/IP protokola potrebno je podesiti postavke na upravljačkoj jedinici robota. Prvo je podešena IP adresa priključka 2 na robotskoj upravljačkoj jedinici prema tablici 12, kao što je prikazano na slici 49. Provjera vidljivosti upravljačke jedinice i uređaja za zavarivanje na mreži se može obaviti takozvanim PING-om.



Slika 49. Postavljanje IP adrese priključka 2 upravljačke jedinice

U komunikaciji putem Ethernet/IP-a, komunikacija je strukturirana po modelu klijent-poslužitelj. Klijent, koji inicira komunikaciju i šalje zahtjeve, naziva se skener, dok se poslužitelj, koji odgovara na zahtjeve i daje tražene informacije, naziva adapter. Na upravljačkoj jedinici robota u postavkama Ethernet/IP signala potrebno je izvor za zavarivanje podesiti kao skener s postavkama kao što je prikazano na slici 50. Tako podešena komunikacija omogućuje upravljačkoj jedinici robota da koordinira i kontrolira operacije u kombinaciji s izvorom struje za zavarivanje koji daje robotu informacije poput parametara za zavarivanje, statusa zavarivanja, poruke o pogreškama i slično.



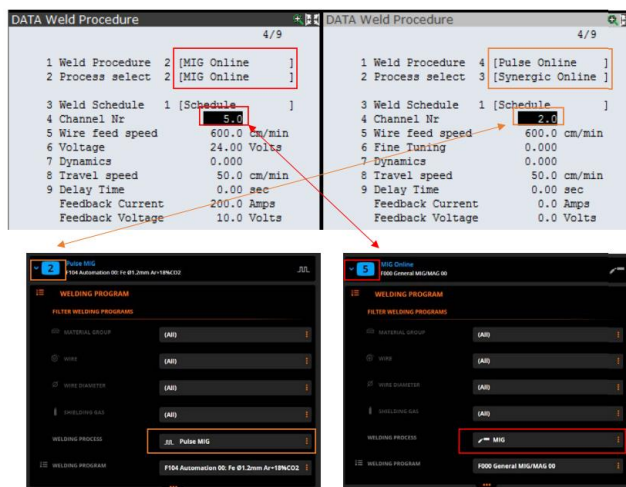
Slika 50. Postavke skenera za Ethernet/IP komunikaciju

6.3. Podešavanje sustava za rad

Podešavanje sustava za rad zahtjeva učitavanje .XML datoteke za automatsko podešavanje signala između izvora struje za zavarivanje i robota. To se radi kako bi se osiguralo pravilno i učinkovito komuniciranje između različitih komponenti sustava. Korištenjem .XML datoteke smanjuje se mogućnost pogrešaka koje mogu nastati prilikom ručnog unosa podataka, čime se poboljšava pouzdanost i točnost procesa zavarivanja. Osim toga, ovakav pristup omogućava bržu i lakšu konfiguraciju sustava, što je ključno za produktivnost i učinkovitost u industrijskom okruženju.

.XML datoteka može se dobiti od proizvođača opreme za zavarivanje ili se mapiranje signala može i ručno odraditi. Nakon učitavanja datoteke na upravljačku jedinicu robota preko USB priključka, prate se instrukcije na ekranu privjeska za učenje i određuju se rasponi digitalnih ulaza i izlaza upravljačke jedinice robota prema .XML datoteci i upravljačku jedinicu je nakon toga potrebno ponovo pokrenuti kako bi se promjene spremile. Nakon ponovnog pokretanja upravljačke jedinice, može se brzo provjeriti ispravnost mapiranja digitalnih ulaznih i izlaznih signala testiranjem tipki za plin i žicu na privjesku za učenje.

Kako bi se omogućilo povezivanje i upravljanje postupcima i parametrima postupaka za zavarivanje preostaje još podesiti postupke za zavarivanje na upravljačkoj jedinici robota. Oni se podešavaju prema kanalima i postupcima zavarivanja s izvora struje za zavarivanje kao što je prikazano na slici 51.



Slika 51. Pravilno podešeni postupci za zavarivanje na upravljačkoj jedinici robota

Nakon provedenog povezivanja i podešavanja komunikacije izvora struje za zavarivanje i robota, sustav je spreman za rad.

7. EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni dio rada proveden je u svrhu usporedbe WiseThin modificiranog MAG postupka zavarivanja s konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja. Eksperiment je proveden na uzorcima osnovnog materijala od konstrukcijskog čelika S235JR različitih debljina materijala. Provedeno je zavarivanje kutnih spojeva koristeći oba postupka zavarivanja. Uzorci su podvrgnuti razornim i nerazornim ispitivanjima sukladno normi HRN EN ISO 15614-1.

7.1. Osnovni materijal

Korišteni osnovni materijal je konstrukcijski nelegirani čelik oznake S235JR prema europskoj normi EN 10027-1. Slovni dio oznake „S“ označava konstrukcijski čelik, „JR“ označava vrijednost Charpy-jevog udarnog rada loma od 27 J na sobnoj temperaturi (20°C), dok broječni dio oznake označava granicu razvlačenja materijala u MPa, a ona konkretno za odabrani materijal iznosi 235 MPa. Ovaj materijal se često koristi u građevinskim i inženjerskim primjenama zbog dobrih mehaničkih svojstava i dobre zavarljivosti. Za konstrukcijske čelike kemijski sastav nije propisan, ali su zajamčena mehanička svojstva materijala. Ovi čelici su skloni koroziji, stoga se često zahtijevaju zaštitni premazi ili posebno održavanje u korozivnim okruženjima. Tablica 13 prikazuje svojstva odabranog materijala, a tablica 14 preporuke za kemijski sastav materijala. Debljine odabranog materijala na kojem je proveden eksperimentalni dio rada su 1,5 mm, 2 mm i 3 mm.

Tablica 13. Mehanička svojstva materijala S235JR za debljine do 16 mm prema standardu EN 10025-2 [38]

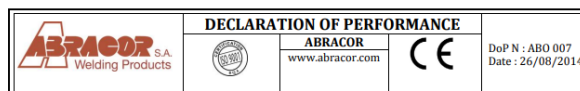
Oznaka čelika			Mehanička svojstva materijala			
Norma			$R_{m, min}$, MPa	$R_{p0,2, min}$, MPa	$A_{5, min}$, %	Tvrdoća po Brinell-u, HB
EN	HRN	DIN				
S235JR	Č.0361	St37-2	360 -510	235	26	100-120

Tablica 14. Kemijski sastav materijala S235JR za debljine do 16 mm prema standardu EN 10025-2 [38]

Oznaka materijala	Maseni udio kemijskog elementa, %				
	C	Mn	P	S	Cu
S235JR	≤ 0,17	≤ 1,4	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,55

7.2. Dodatni materijal

Korišteni dodatni materijal u eksperimentalnom dijelu rada je puna žica promjera 1,0 mm za zavarivanje ugljičnih i niskolegiranih čelika, što uključuje čelik S235JR. Oznaka žice prema standardu EN ISO 14341-A je G 42 4 M21 G 3Si1, a riječ je o žici proizvođača *Abracor*, trgovačkog naziva ABRAFIL 1. Izjava o svojstvima žice prikazana je na slici 52.



1. Unique identification code of the product-type:
EN ISO 14341-A G42 4 M21 G3 Si / G 42 3 C1 G3 Si
2. Type, batch or serial number or any other element allowing identification of the construction product as required pursuant to Article 11(4):
ABRAFIL 1
3. Intended use or uses of the construction product, in accordance with the applicable harmonised technical specification, as foreseen by the manufacturer:
Welding consumable used in metallic structures or in composite metal and concrete structures
4. Name, registered trade name or registered trade mark and contact address of the manufacturer as required pursuant to Article 11(5):
ABRACOR S.A.
Rue de la Science 2
1400 Nivelles – Belgium
DoP N : ABO 007
5. Where applicable, name and contact address of the authorised representative whose mandate covers the tasks specified in Article 12(2):
Not applicable
6. System or systems of assessment and verification of constancy of performance of the construction product as set out in Annex V:
System 2+
7. In case of the declaration of performance concerning a construction product covered by a harmonized standard:
Notified factory production control certification body number 0038 – Lloyds Register, 71 Fenchurch St, London EC3M 4BS, United Kingdom – performed the initial inspection of the manufacturing plant and of factory production control and the continuous surveillance, assessment and evaluation of factory production control and issued the certificate of conformity of the factory production control; Certificate n°: 0038-CPR-ANT1440157
8. In case of the declaration of performance concerning a construction product for which a European Technical Assessment has been issued:
Not applicable
9. Declared performance:

Essential characteristics (EN 13479:2004)	Performance	Harmonized technical specification
Tolerances on dimensions	Passed	EN 13479:2004; EN ISO 544:2011
Elongation (%)	≥20	EN 13479:2004; EN ISO 14341-A:2011
Tensile strength (MPa)	500-640	EN 13479:2004; EN ISO 14341-A:2011
Yield strength (MPa)	≥420	EN 13479:2004; EN ISO 14341-A:2011
Impact toughness	≥47J; -40	EN 13479:2004; EN ISO 14341-A:2011
Chemical composition	Passed	EN 13479:2004; EN ISO 14341-A:2011
Durability	Passed	EN 13479:2004
Dangerous substances	Passed	EN 13479:2004
Emission of radioactivity	Is not relevant	EN 13479:2004
10. The performance of the product identified in points 1 and 2 is in conformity with the declared performance in point 9.
This declaration of performance is issued under the sole responsibility of the manufacturer identified in point 4.

Slika 52. Izjava o svojstvima korištene žice [39]

7.3. Zaštitna atmosfera

U eksperimentu je korišten dvokomponentni zaštitni plin Ferroline C18 proizvođača Messer. Ovaj plin je mješavina Ar i CO₂ u volumnom omjeru 82 % Ar i 18 % CO₂, oznake grupe M21 prema HRN EN ISO 14175. Na slici 53 prikazan je spremnik korištenog zaštitnog plina.



Slika 53. Spremnik zaštitnog plina Ferroline C18

7.4. Slobodni kraj žice

Duljina slobodnog kraja žice kod provedbe robotiziranog zavarivanja na svim uzorcima u eksperimentalnom dijelu rada iznosila je 10 mm, kao što je prikazano na slici 54.

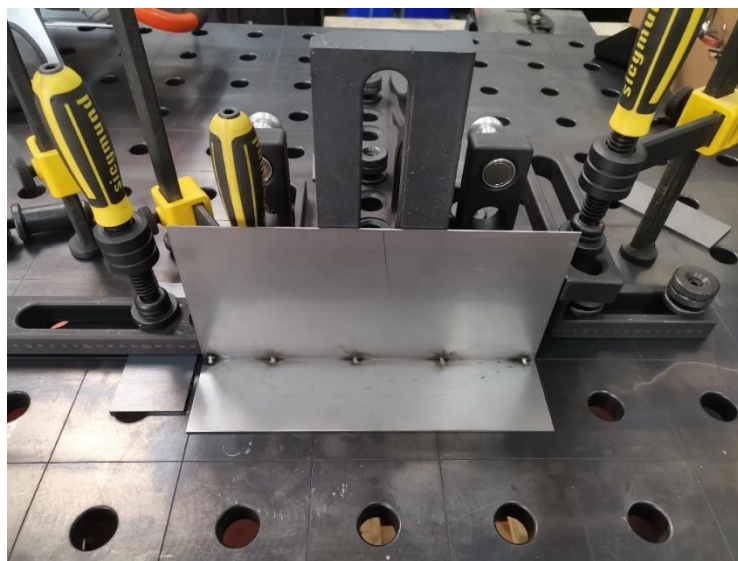


Slika 54. Mjerenje duljine slobodnog kraja žice

Na stanici za čišćenje i održavanje pištolja za zavarivanje žica se reže na uvijek istu duljinu slobodnog kraja žice kako bi se osigurali isti uvjeti zavarivanja za svaki zavareni spoj.

7.5. Priprema uzoraka za zavarivanje

Tehnologijom laserskog rezanja su izrezane ploče dimenzija 300 mm x 150 mm od osnovnog materijala S235JR, debljina materijala 1,5 mm, 2 mm i 3 mm. Prije pripajanja uzoraka površine materijala su odmašćene i očišćene alkoholom. Pripajanje pripremljenih uzoraka za kutni spoj izvedeno je u napravi za pripajanje kao što je prikazano na slici 55.



Slika 55. Pripajanje testnih ploča u napravi za pripajanje

Nakon pripajanja kutnog spoja testni uzorci su stegnuti na pozicioner robota kao što je prikazano na slici 56.



Slika 56. Stezanje testnih uzoraka na pozicioner robota

7.6. Postupak zavarivanja kutnog spoja

Zavarivanje kutnog spoja provedeno je na šest uzoraka, po dva za svaku odabranu debljinu osnovnog materijala, s dva različita postupka zavarivanja, WiseThin postupkom i konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja. Tehnologija procesa zavarivanja osmišljena je da se dobije jednaka visina kutnog zvara kod WiseThin i MAG postupka zavarivanja. Na debljini osnovnog materijala od 1,5 mm odabrana je visina kutnog zvara 2 mm, na debljini 2 mm visina kutnog zvara 2,5 mm i na debljini osnovnog materijala od 3 mm visina kutnog zvara 3 mm. Kod svih uzoraka za zavarivanje način prijenosa metala bio je prijenos kratkim spojevima u PA položaju zavarivanja koristeći pozicioner za okretanje uzoraka u odgovarajući položaj zavarivanja, kao što je prikazano na slici 57.



Slika 57. Uzorak u PA položaju zavarivanja

Korištena je lijeva tehnika rada tehnika s kutom nagiba pištolja za zavarivanje od 10 stupnjeva kao što je prikazano na slici 58.



Slika 58. Položaj pištolja za zavarivanje – lijeva tehnika rada

Parametri zavarivanja uzoraka u eksperimentalnom dijelu rada prikazani su u tablici 15. Unos topline izračunat je prema jed. (1). Uzorci su označeni od najmanje korištene debljine osnovnog materijala do najveće, neparnim brojevima za MAG postupak zavarivanja i parnim brojevima za WiseThin postupak zavarivanja.

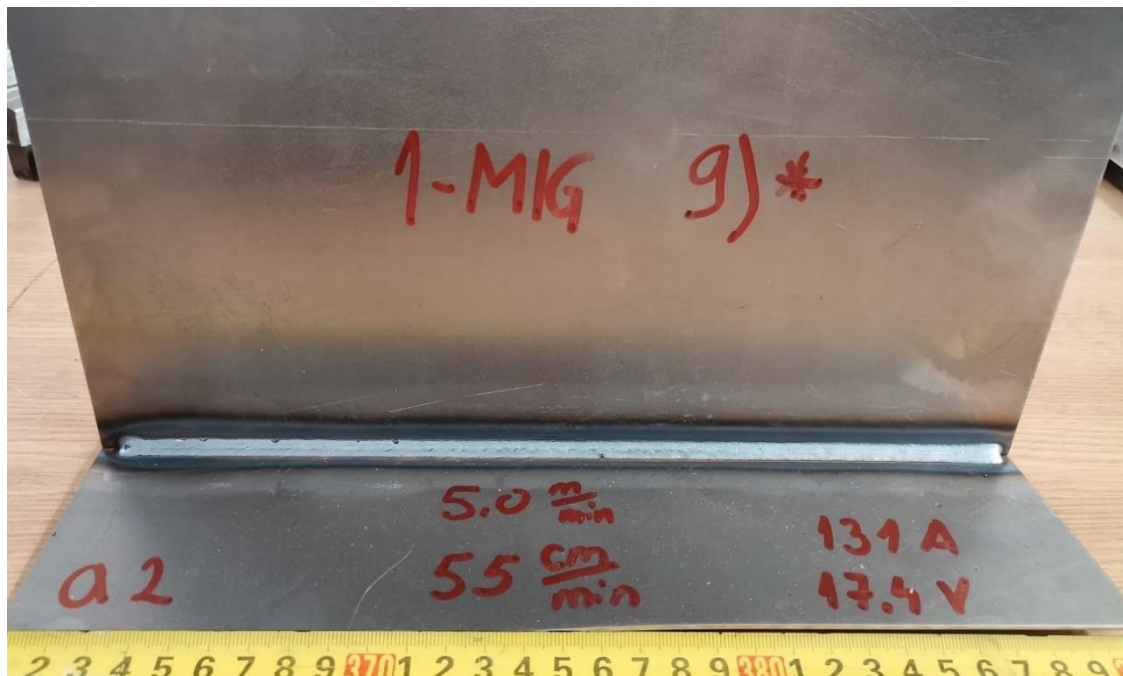
Tablica 15. Parametri zavarivanja eksperimentalnog rada

Uzorak	1	2	3	4	5	6
Debljina osnovnog materijala, mm	1,5	1,5	2,0	2,0	3,0	3,0
Postupak zavarivanja	MAG	WiseThin	MAG	WiseThin	MAG	WiseThin
Protok plina, L/min	15	15	15	15	15	15
Duljina slobodnog kraja žice, mm	10	10	10	10	10	10
Struja zavarivanja, A	131	145	125	125	161	161
Napon zavarivanja, V	17,4	17,2	17,2	17,2	18,5	18,0
Brzina dobave žice, m/min	5,0	6,3	4,5	5,3	6,0	6,6
Brzina zavarivanja, cm/min	55	70	37,5	41	34	40
Unos topline, kJ/cm	2,065	1,710	2,752	2,517	4,204	3,478

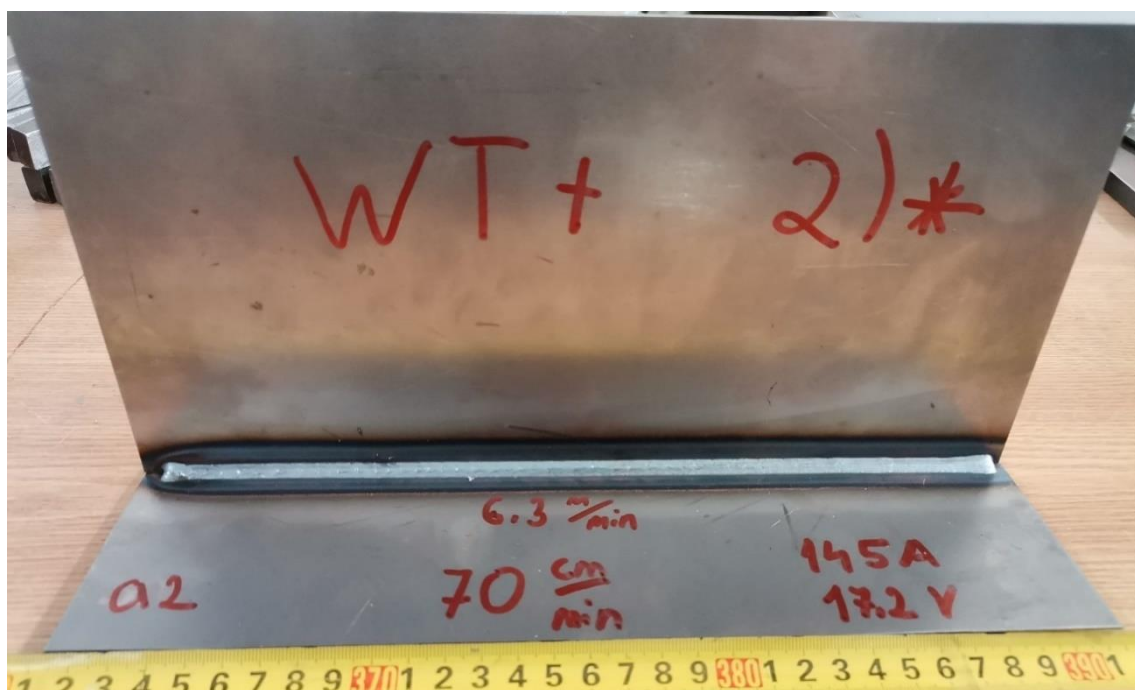
Struja i napon zavarivanja su tijekom zavarivanja bili konstantni, stoga je električni luk tijekom zavarivanja također bio stabilan. Kod WiseThin postupka, za istu jakost struje i napona zavarivanja kao kod MAG postupka, brzina dobave žice je veća u odnosu na MAG postupak zavarivanja. Cilj je bio dobiti istu visinu zavara kod oba postupka zavarivanja, stoga veću brzinu dobave žice prati i povećanje brzine zavarivanja, a posljedično i manji unos topline kod WiseThin postupka u odnosu na

MAG postupak zavarivanja. Manji unos topline kod WiseThin postupka smanjuje rizik od pregorijevanja i deformaciju materijala.

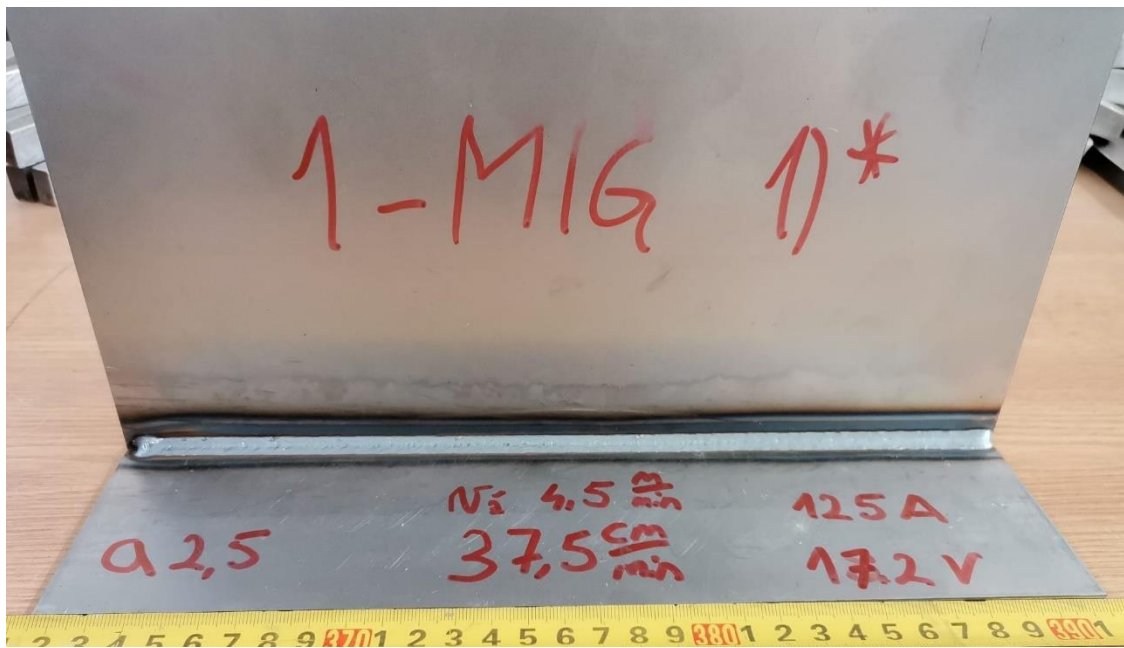
Na slikama od 58. do 63. prikazani su zavareni uzorci s parametrima iz tablice 15.



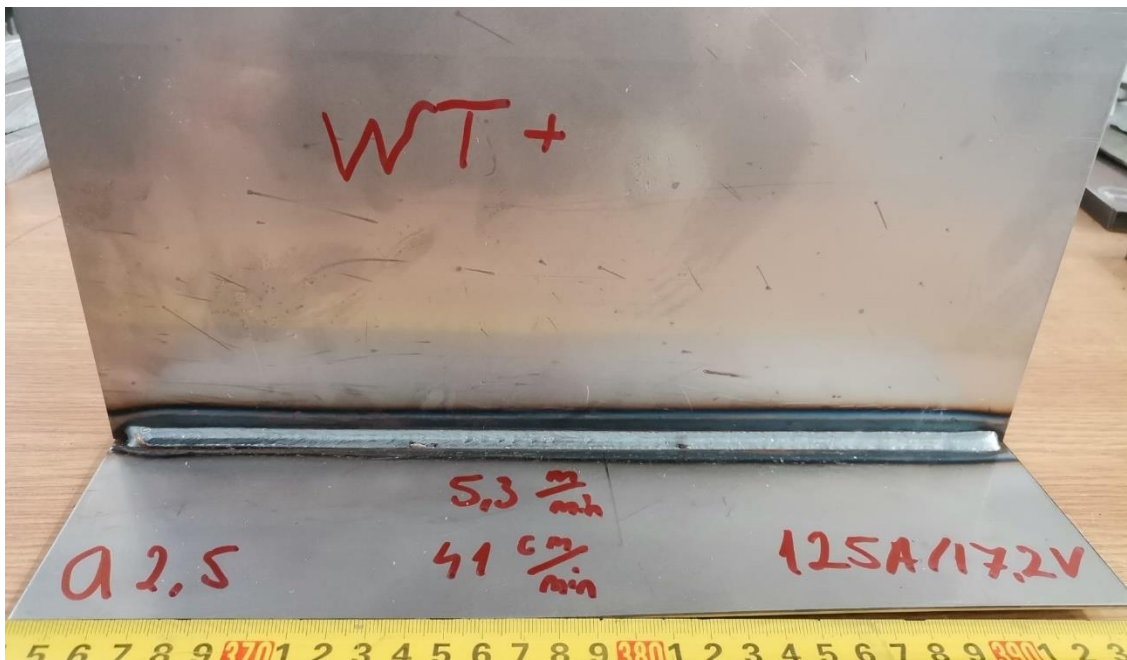
Slika 58. Zavareni uzorak 1



Slika 59. Zavareni uzorak 2



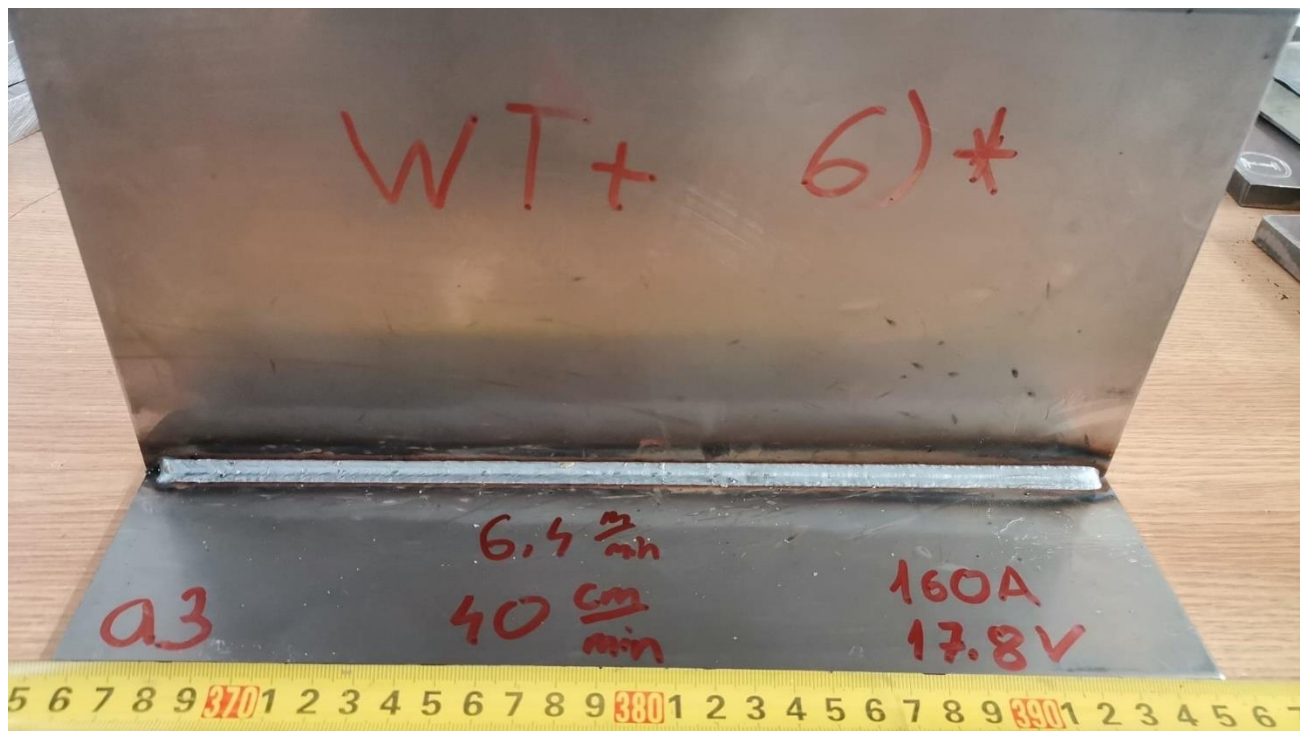
Slika 60. Zavareni uzorak 3



Slika 61. Zavareni uzorak 4



Slika 62. Zavareni uzorak 5



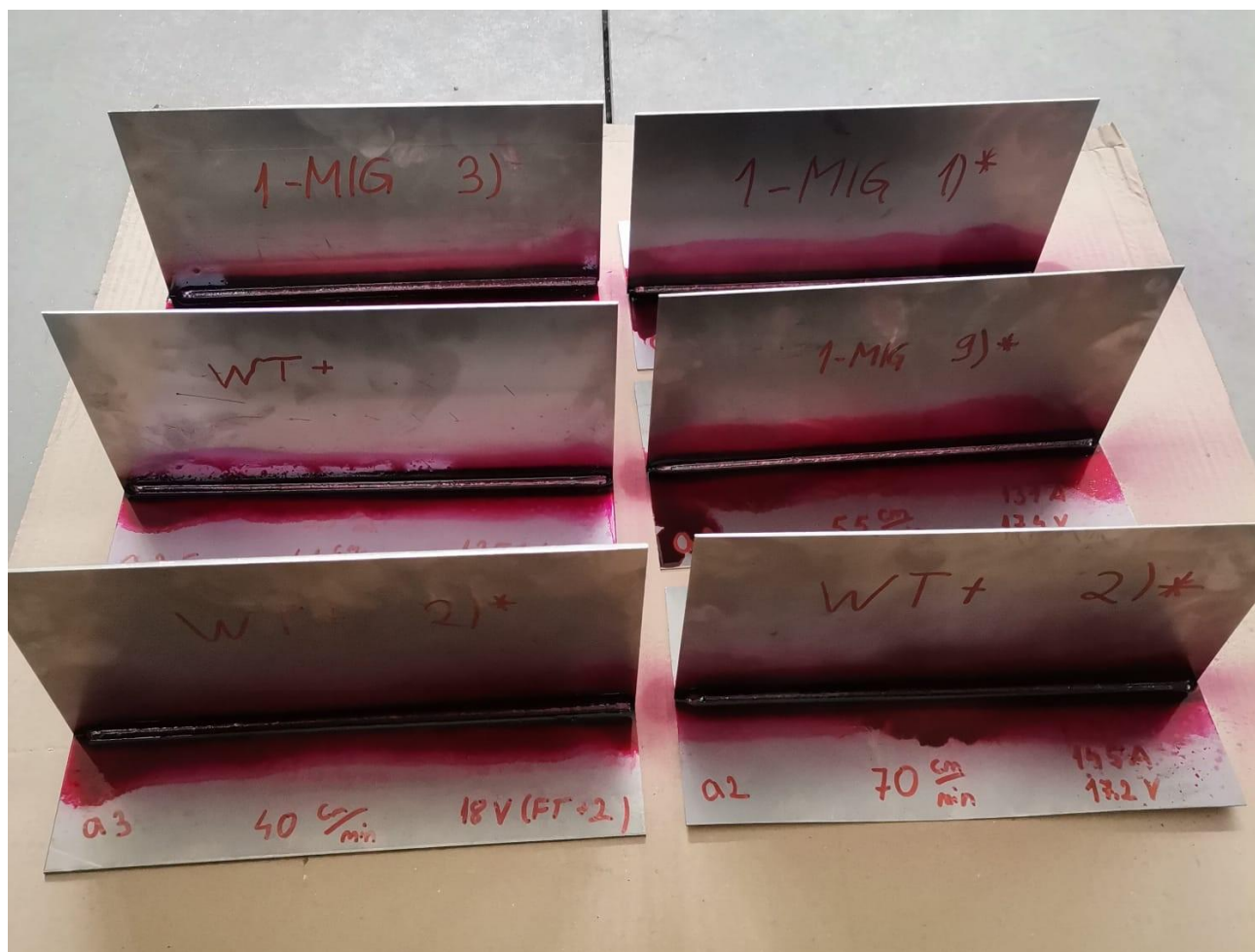
Slika 63. Zavareni uzorak 6

Vizualna kontrola provedena je prije, tijekom i nakon postupka zavarivanja navedenih uzoraka. Na površinama zavara nisu primijećene vidljive greške. Kod zavara izvedenih WiseThin postupkom pojava rasprskavanja je manja u odnosu na MAG postupak, a rasprskane kapljice su veličinom manje nego kod zavara izvedenog MAG postupkom.

7.7. Ispitivanje penetrantima

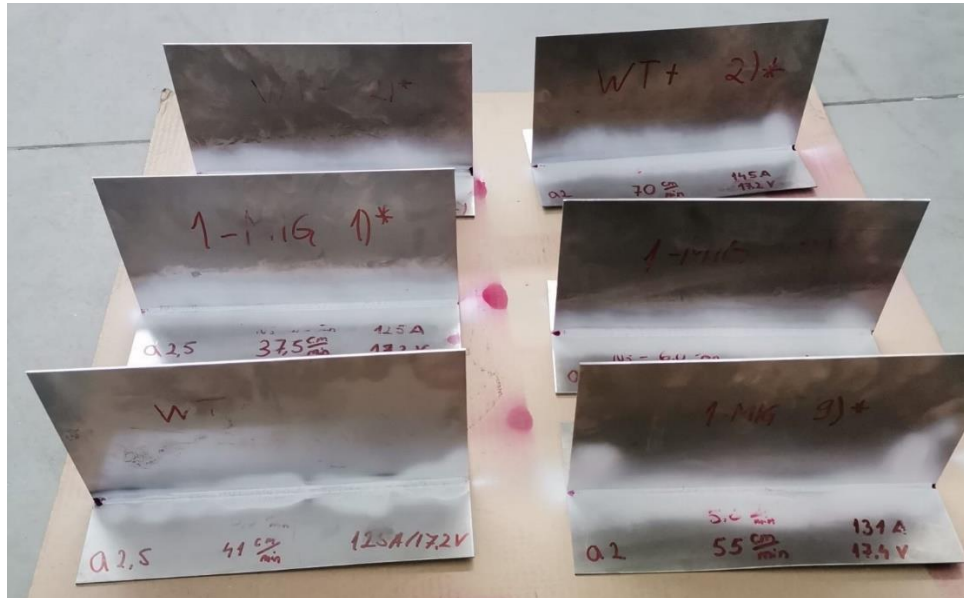
Penetrantsko ispitivanje često se primjenjuje kod ispitivanja zavarenih spojeva kao nerazorna metoda ispitivanja za otkrivanje pukotina i diskontinuiteta u zavaru. Penetrant kapilarnim djelovanjem ulazi u površinske pukotine. Ovom metodom nije moguće odrediti dimenzije i ostale karakteristike pukotina.

Na prethodno očišćenu i odmašćenu površinu zavara nanesen je penetrant crvene boje, kao što je prikazano na slici 64. Penetrant je nanesen okomito na površinu zavara s udaljenosti od 20 cm.



Slika 64. Nanošenje penetranta na površinu zavara

Nakon 15 do 30 minuta penetrant je s površine odstranjen vodom i vlažnom krpom. Kod uklanjanja vodom pazilo se da je mlaz vode usmjeren paralelno s površinom metala kako mlaz vode ne bi istisnuo penetrant iz pukotine. Nakon što su uzorci očišćeni od penetranta, površine su osušene suhom krpom i na cijelu površinu zavara nanesen je razvijajući bijele boje, kao što je prikazano na slici 65, koji izvlači penetrant na površinu. Razvijajući se nanosi okomito na površinu zavara s udaljenosti od 20 cm.

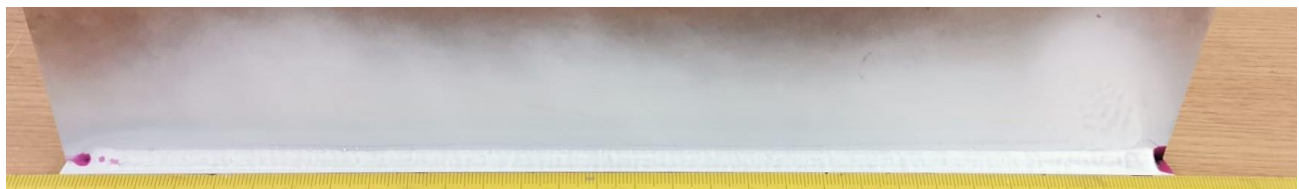


Slika 65. Nanošenje razvijajuća na površinu zavara

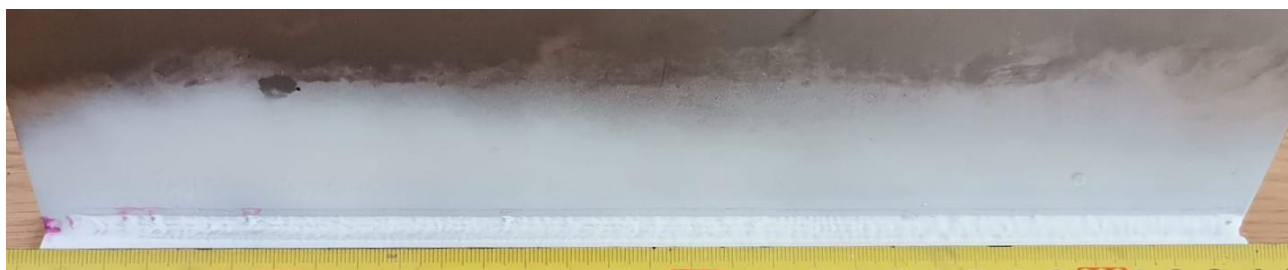
Nakon vremena sušenja razvijajuća od 30 minuta, pristupljeno je kontroli indikacija pukotina. Na slikama od slike 66 do 71 prikazani su zavari uzoraka nakon sušenja razvijajuća.



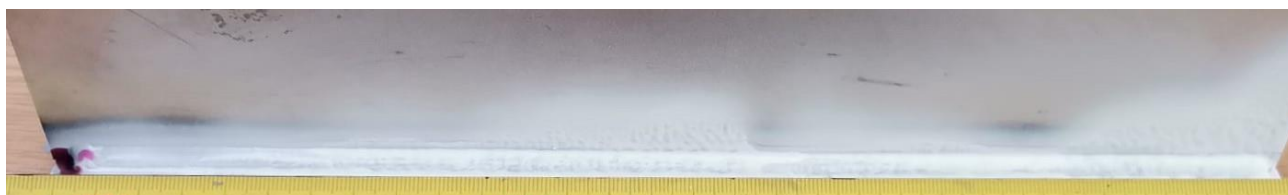
Slika 66. Pregled indikacija pukotina na uzorku 1



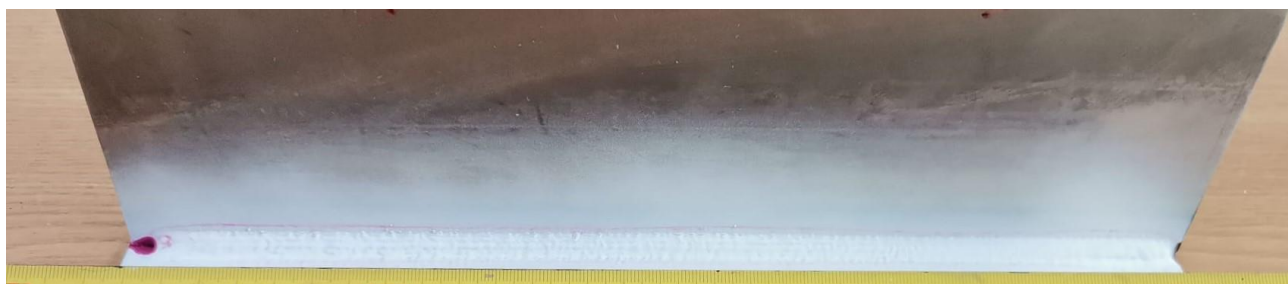
Slika 67. Pregled indikacija pukotina na uzorku 2



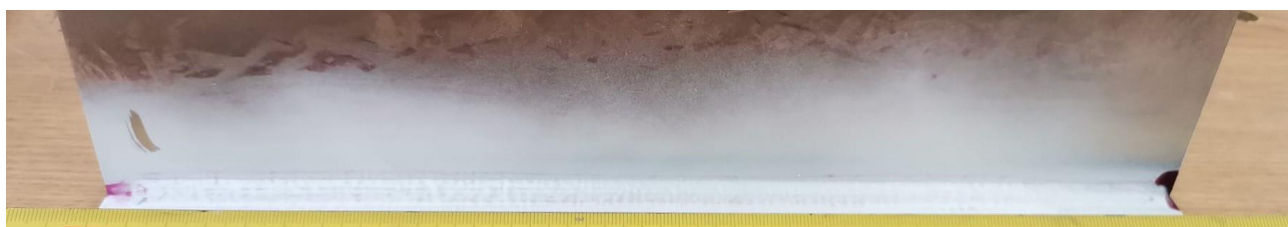
Slika 68. Pregled indikacija pukotina na uzorku 3



Slika 69. Pregled indikacija pukotina na uzorku 4

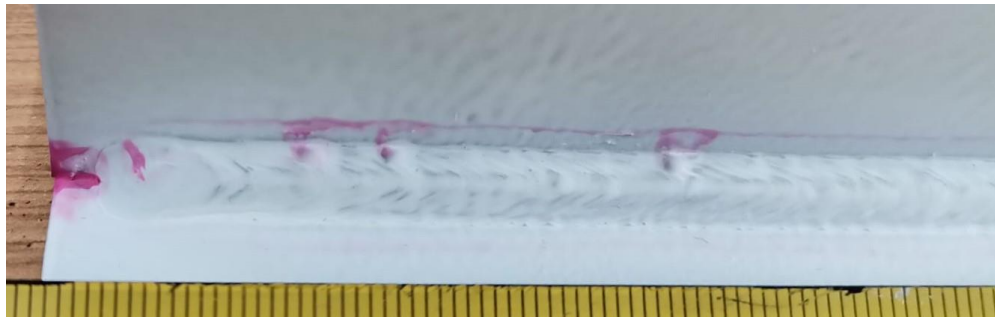


Slika 70. Pregled indikacija pukotina na uzorku 5



Slika 71. Pregled indikacija pukotina na uzorku 6

Na zavarenom uzorku 3 pojavile su se indikacije pukotina pri završetku zavara, kao što je prikazano na slici 72.



Slika 72. Indikacije diskontinuiteta na uzorku 3

Vidljive indikacije diskontinuiteta u zavaru su veličine 1 mm. Sukladno normi ISO 23277, koja opisuje razine prihvaćanja diskontinuiteta u zavaru pri ispitivanju penetrantima, ove indikacije spadaju u prihvatljive indikacije [40].

Na svim ostalim uzorcima nema indikacija pukotina, stoga su zavari zadovoljili na ispitivanju penetrantima.

7.8. Makroizbrusci zavarenih uzoraka

Nakon ispitivanja nerazornim metodama, iz zavarenih uzoraka izrezani su makroizbrusci na tračnoj pili, kao što je prikazano na slici 73, na dimenzije sukladno normi HRN EN ISO 15614-1.



Slika 73. Rezanje makroizbrusaka na tračnoj pili

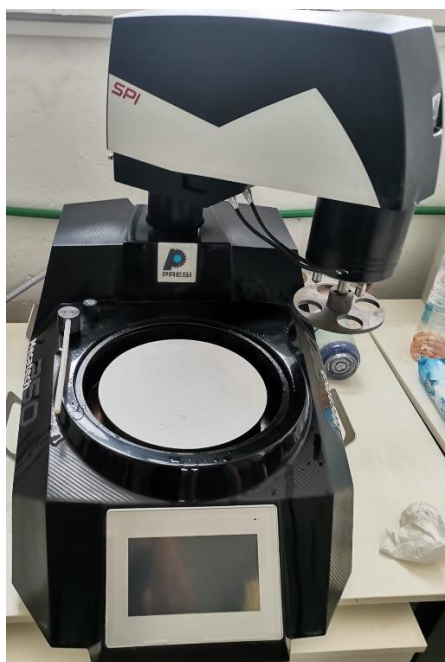
Nakon rezanja na tračnoj pili, uzorci su podvrgnuti brušenju na tračnoj brusilici, prikazanoj na slici 74.



Slika 74. Tračna brusilica

Nakon toga odrađeno je grubo brušenje ručnim postupkom brusnim papirima granulacija P240, P320 i P400.

Brušenje i poliranje makroizbrusaka provedeno je na uređaju Mecatech 250 proizvođača Presi, prikazanom na slici 75.

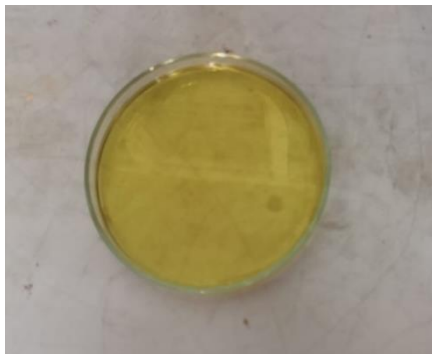


Slika 75. Uređaj za fino brušenje i poliranje Mecatech 250

Fino brušenje i poliranje provedeno je brusnim papirima granulacija: P320, P600, P1000, P2400 i P4000. Tijekom svih koraka obrade, brzina vrtnje je iznosila 300 okretaja u minuti. Kao sredstvo za

hlađenje i podmazivanje se je koristila voda kako ne bi došlo do pretjeranog zagrijavanja makroizbrusaka.

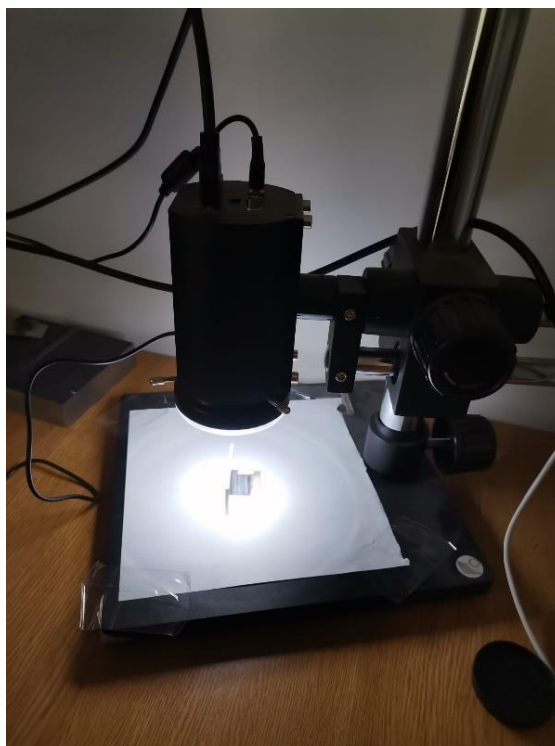
Nakon poliranja, uzorci su nagriženi u tri postotnom nitalu, prikazanom na slici 76.



Slika 76. Tri postotna otopina nitala za nagrizanje uzoraka

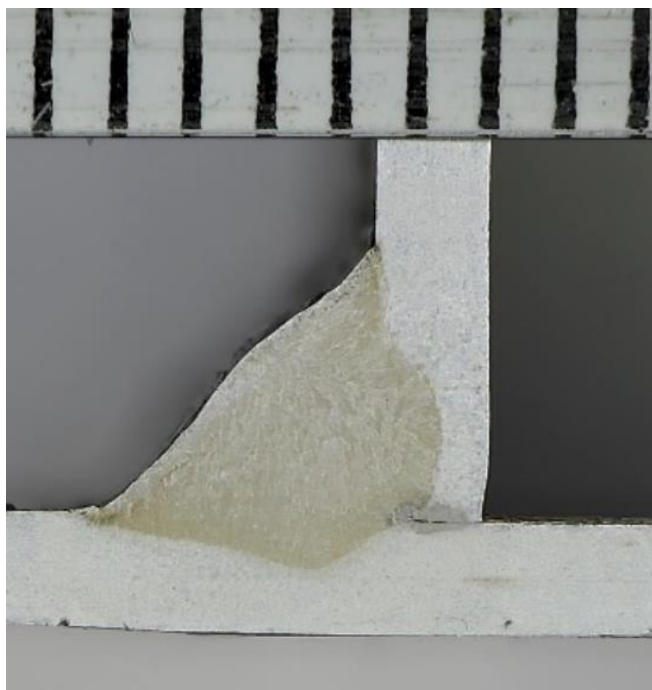
Nakon nagrizanja, uzorci su isprani vodom kako bi se prekinula kemijska reakcija nagrizanja i osušeni.

Na slici 77 prikazan je digitalni mikroskop proizvođača Insize korišten za analizu makrostrukture zavara makroizbrusaka.

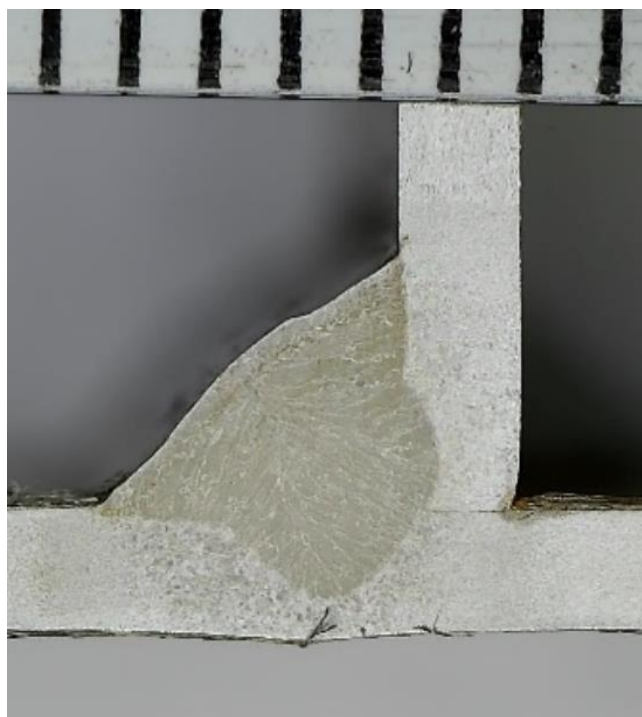


Slika 77. Digitalni mikroskop Insize

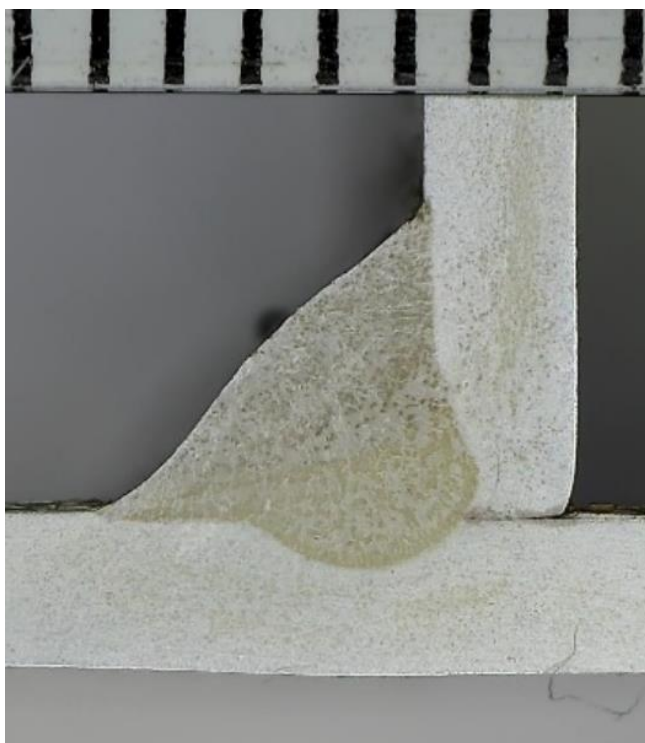
Na slikama od 78 do 83 prikazani su makroizbrusci uzoraka nakon nagrizanja.



Slika 78. Makroizbrusak uzorka 1



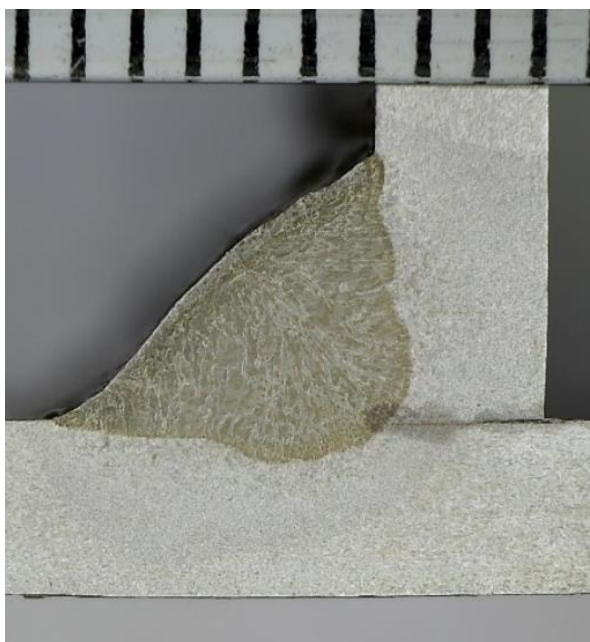
Slika 79. Makroizbrusak uzorka 2



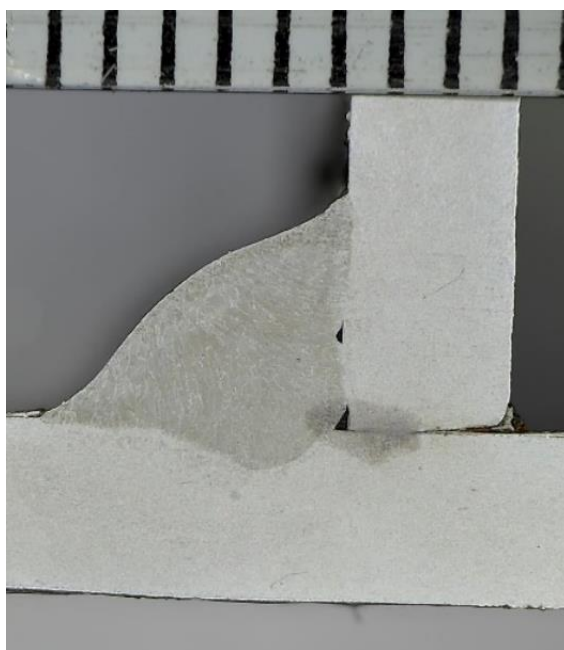
Slika 80. Makroizbrusak uzorka 3



Slika 81. Makroizbrusak uzorka 4



Slika 82. Makroizbrusak uzorka 5



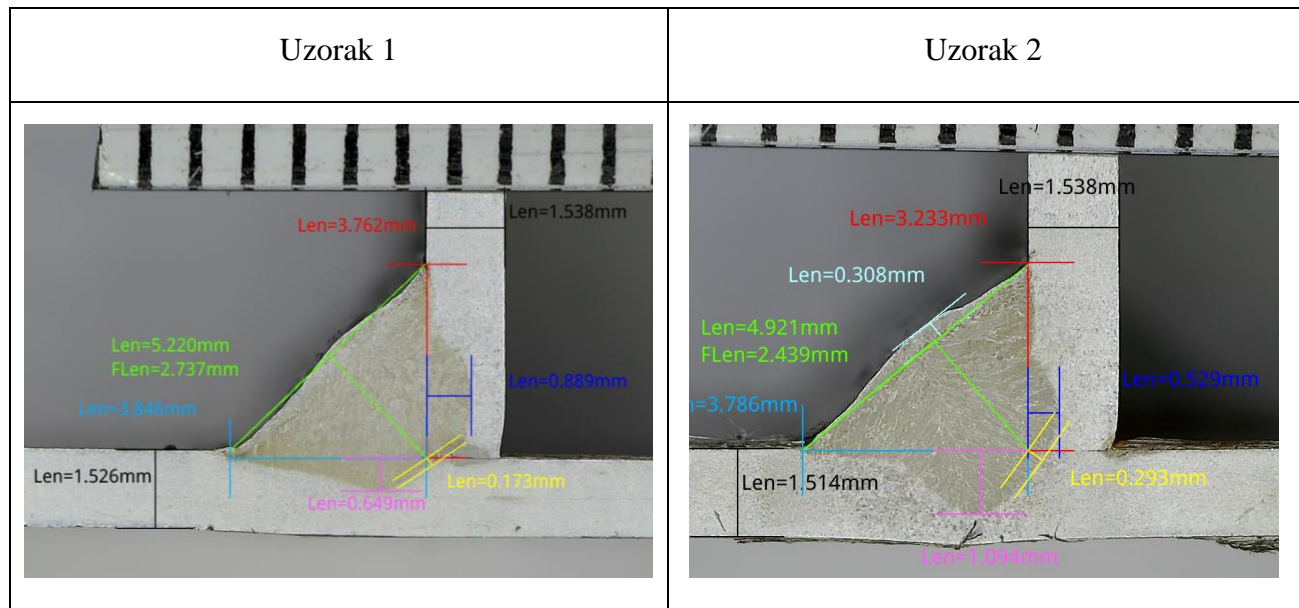
Slika 83. Makroizbrusak uzorka 6

Zbog nagrizanja vidi se razlika između metala zavara, zone utjecaja topline i osnovnog materijala. Jasno se uočava područje zavara i zona staljivanja, dok je zona utjecaja topline na nekim uzorcima slabije vidljiva zbog mjestimičnog slabijeg nagrizanja kiseline. Na slici 83 vidi se naljepljivanje vertikalne strane zavara na osnovni materijal i nedovoljno protaljivanje kod uzorka 6.

7.9. Analiza geometrije zavora

Za analizu geometrije zavarenog spoja korišten je program digitalnog mikroskopa proizvođača Insize. U tablici 16 prikazani su makroizbrusci uzoraka 1 i 2. Uzorak 1 zavaren je MAG postupkom, a uzorak 2 WiseThin postupkom.

Tablica 16. Makroizbrusci uzoraka 1 i 2 s karakterističnim dimenzijama zavora



U tablici 17 prikazana je usporedba karakterističnih dimenzija zavora uzoraka 1 i 2.

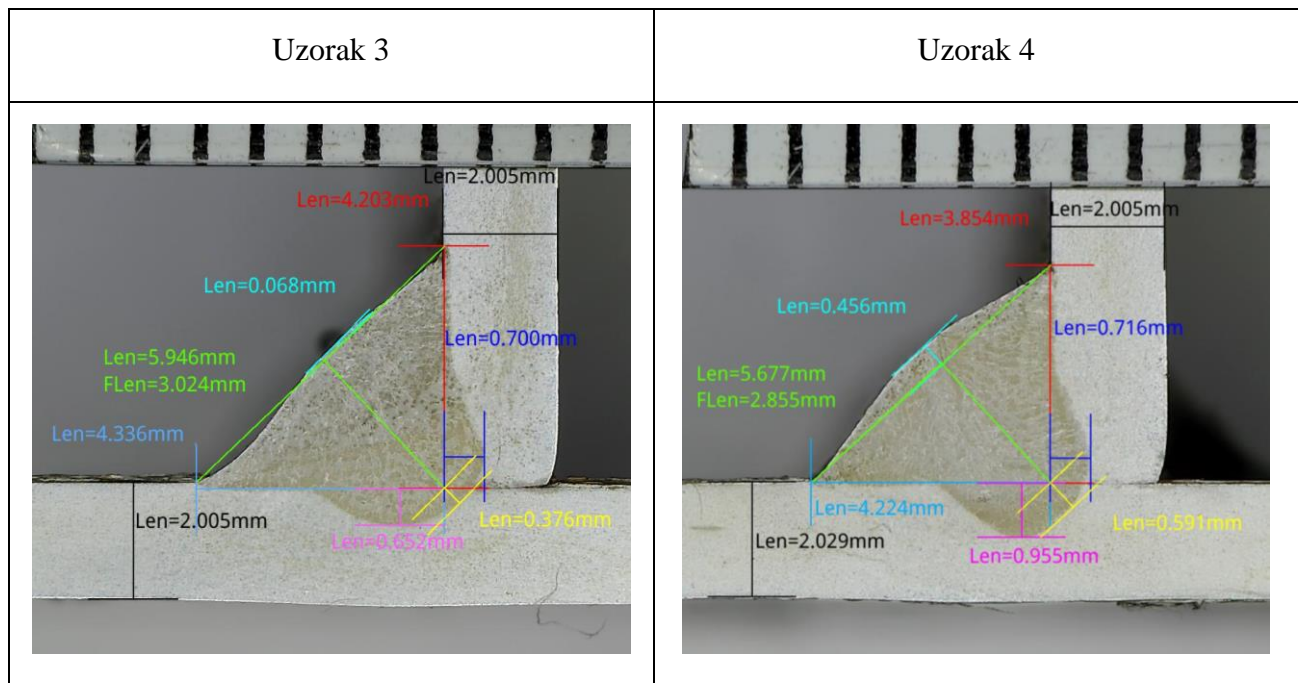
Tablica 17. Geometrija zavarenih spojeva uzoraka 1 i 2

Uzorak	1	2
Debljina osnovnog materijala, mm	1,5	1,5
Visina zavora, mm	2,737	2,439
Nadvišenje zavora, mm	-	0,308
Dubina penetracije, mm	0,173	0,293
Penetracija u vertikalnu ploču, mm	0,889	0,529
Penetracija u horizontalnu ploču, mm	0,649	1,094

Uzorak 1 ima veću visinu kutnog zavora, ali bez izraženog nadvišenja zavora, kao što je kod uzorka 2. Kod uzorka 1 penetracija u vertikalnu ploču je veća, ali je dubina penetracije i penetracija u horizontalnu ploču manja nego kod uzorka 2.

U tablici 18 prikazani su uzorci 3 i 4. Uzorak 3 zavaren je MAG postupkom, a uzorak 4 WiseThin postupkom.

Tablica 18. Makroizbrusci uzoraka 3 i 4 s karakterističnim dimenzijama zavora



U tablici 19 prikazana je usporedba karakterističnih dimenzija zavora uzoraka 3 i 4.

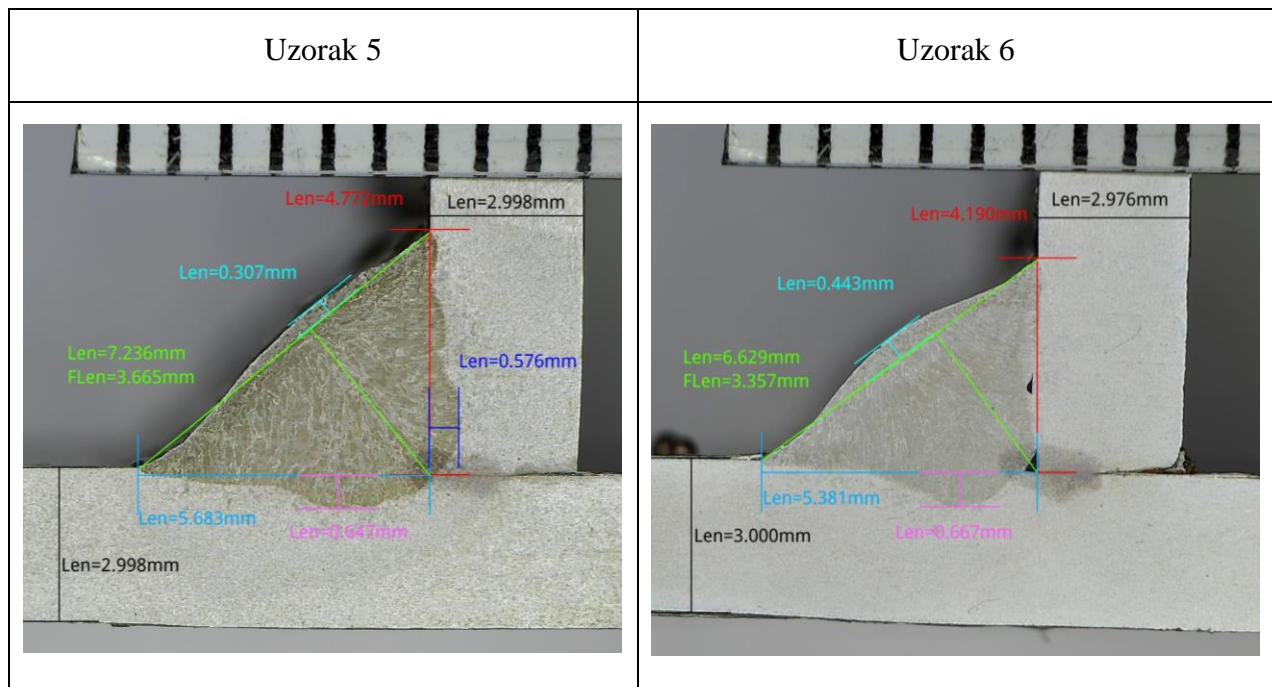
Tablica 19. Geometrija zavarenih spojeva uzoraka 3 i 4

Uzorak	3	4
Debljina osnovnog materijala, mm	2	2
Visina zavora, mm	3,024	2,855
Nadvišenje zavora, mm	0,068	0,456
Dubina penetracije, mm	0,376	0,591
Penetracija u vertikalnu ploču, mm	0,700	0,716
Penetracija u horizontalnu ploču, mm	0,659	0,955

Uzorak 3 ima veću visinu kutnog zavora nego uzorak 4. Kod uzorka 3 nadvišenje zavora je minimalno, dok je kod uzorka 4 izraženo nadvišenje zavora. Kod uzorka 3, dubina penetracije, penetracija u vertikalnu ploču i penetracija u horizontalnu ploču manje su nego kod uzorka 4.

U tablici 20 prikazani su uzorci 5 i 6. Uzorak 5 zavaren je MAG postupkom, a uzorak 6 WiseThin postupkom.

Tablica 20. Makroizbrusci uzorka 5 i 6 s karakterističnim dimenzijama zavora



U tablici 21 prikazana je usporedba karakterističnih dimenzija zavora uzorka 5 i 6.

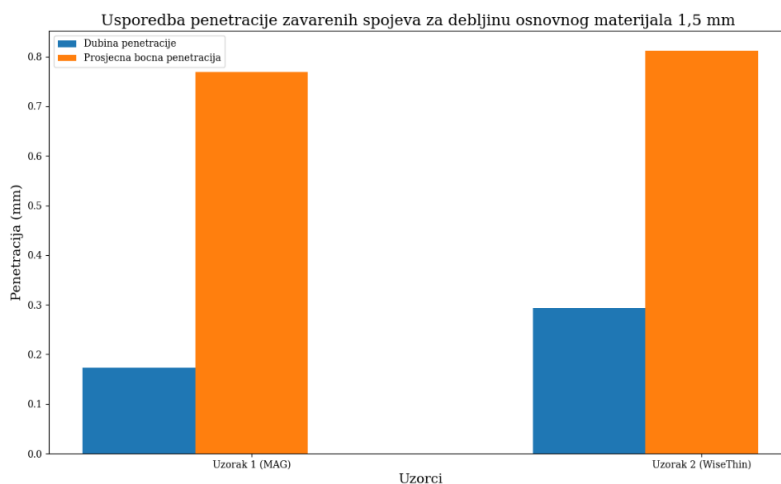
Tablica 21. Geometrija zavarenih spojeva uzorka 5 i 6

Uzorak	5	6
Debljina osnovnog materijala, mm	3	3
Visina zavora, mm	3,665	3,357
Nadvišenje zavora, mm	0,307	0,443
Dubina penetracije, mm	minimalna	-
Penetracija u vertikalnu ploču, mm	0,576	-
Penetracija u horizontalnu ploču, mm	0,647	0,667

Uzorak 5 ima veću visinu kutnog zavora nego uzorak 6. Kod uzorka 6 prisutan je nedovoljni provar i naljepljivanje na vertikalnoj strani zavora. Ove greške u zavarenom spoju pripadaju greškama grupe 4 sukladno normi DIN EN ISO 6520-1, oznake 4011 za naljepljivanje na bočnoj strani zavora i oznake 402 za nedovoljan provar [41].

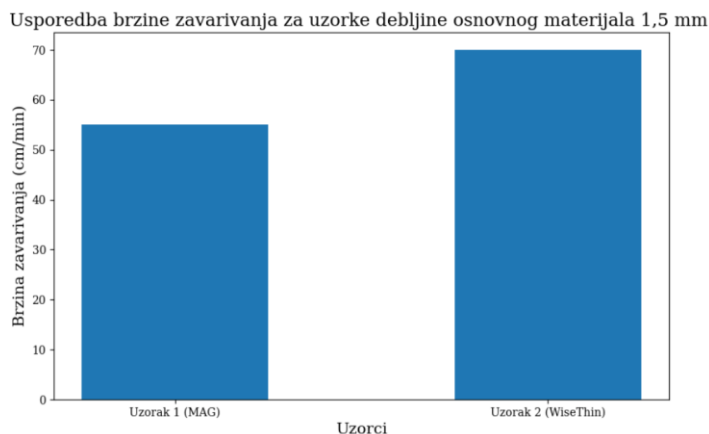
7.10. Analiza rezultata

Na slici 84 prikazan je dijagram usporedbe dubine penetracije i dubine prosječne bočne penetracije za oba korištena postupka zavarivanja na materijalu debljine 1,5 mm. Iz dijagrama je vidljivo da je dubina penetracije i dubina prosječne bočne penetracije veća kod uzorka 2 zavarenog WiseThin postupkom.



Slika 84. Dijagram usporedbe dubine penetracije i dubine prosječne bočne penetracije uzoraka 1 i 2

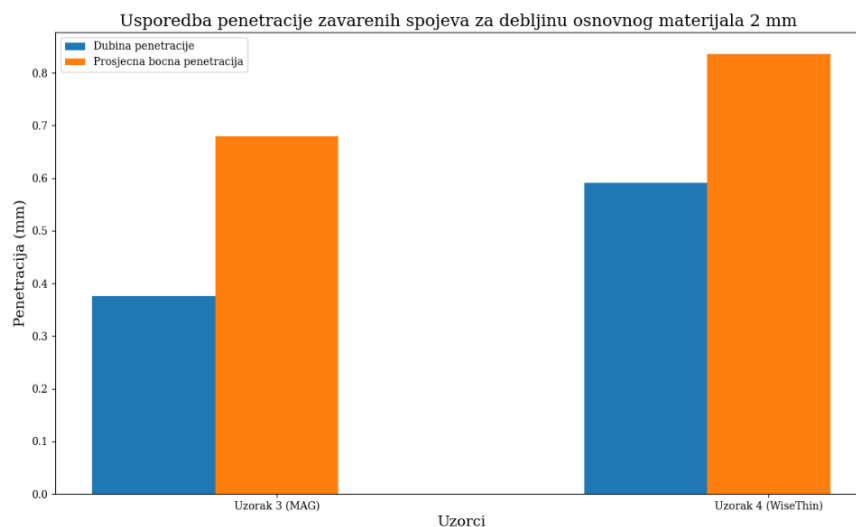
Na slici 85 prikazan je dijagram usporedbe brzine zavarivanja kod uzoraka 1 i 2.



Slika 85. Dijagram usporedbe brzine zavarivanja uzoraka 1 i 2

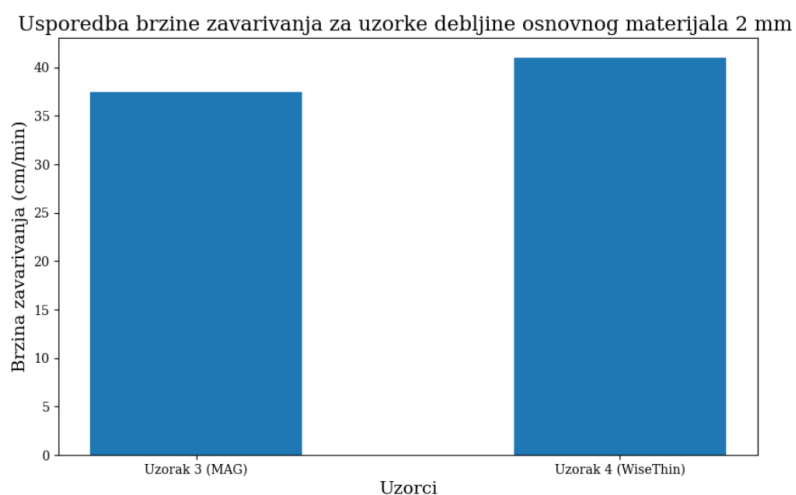
Brzina zavarivanja kod WiseThin postupka na materijalu debljine 1,5 mm je za 27,3 % veća nego kod MAG postupka zavarivanja za postignutu jednaku visinu kutnog zvara. Navedeno povećanje brzine zavarivanja u radnom danu u trajanju od 8 sati, uz prosječno vrijeme uspostavljenog električnog luka od 90 % kod robotiziranog zavarivanja, odgovara razlici u produktivnosti od 65 metara zvara.

Na slici 86 prikazan je dijagram usporedbe dubine penetracije i dubine prosječne bočne penetracije za oba korištena postupka zavarivanja na materijalu debljine 2 mm. Iz dijagrama je vidljivo da je dubina penetracije i dubina prosječne bočne penetracije veća kod uzorka 4 zavarenog WiseThin postupkom.



Slika 86. Dijagram usporedbe dubine penetracije i dubine prosječne bočne penetracije uzoraka 3 i 4

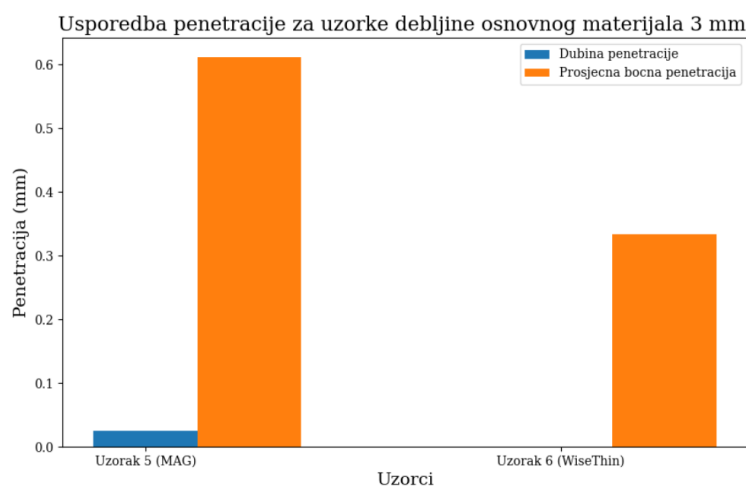
Na slici 87 prikazan je dijagram usporedbe brzine zavarivanja kod uzoraka 3 i 4.



Slika 87. Dijagram usporedbe brzine zavarivanja uzoraka 3 i 4

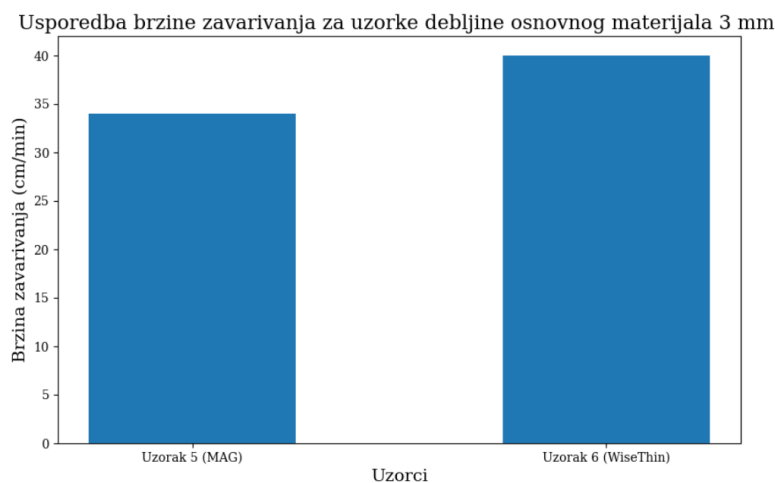
Brzina zavarivanja kod WiseThin postupka na materijalu debljine 2 mm je za 9,3 % veća nego kod MAG postupka zavarivanja za istu visinu kutnog zavara. Navedeno povećanje brzine zavarivanja u radnom danu u trajanju od 8 sati, uz prosječno vrijeme uspostavljenog električnog luka od 90 % kod robotiziranog zavarivanja, odgovara razlici u produktivnosti od 15 metara zavara.

Na slici 88 prikazan je dijagram usporedbe dubine penetracije i dubine prosječne bočne penetracije za oba korištena postupka zavarivanja na materijalu debljine 3 mm. Uzorak 5 ima minimalnu penetraciju, dok je kod uzorka 6 prisutan nedovoljni provar i naljepljivanje na vertikalnoj strani osnovnog materijala. Stoga uzorak 6, zavaren WiseThin postupkom, ima manju dubinu penetracije i prosječnu bočnu penetraciju.



Slika 88. Dijagram usporedbe dubine penetracije i dubine prosječne bočne penetracije uzoraka 5 i 6

Na slici 89 prikazan je dijagram usporedbe brzine zavarivanja kod uzoraka 5 i 6.



Slika 89. Dijagram usporedbe brzine zavarivanja uzoraka 5 i 6

Brzina zavarivanja kod WiseThin postupka na materijalu debljine 3 mm je za 17,6 % veća nego kod MAG postupka zavarivanja za istu visinu kutnog zavora. Kod uzorka 6, zavorenog WiseThin postupkom, prisutan je nedovoljni provar i naljepljivanje na stranici osnovnog materijala. Kako bi se ove greške izbjegle kod zavarivanja materijala debljine 3 mm može se promijeniti tehnika rada iz lijeve u desnu tehniku, što bi rezultiralo većom penetracijom [6]. Zbog izvedbe zavarivanja u području kratkim spojevima i karakteristikama dodatnog materijala, vrijednost jakosti struje ne može se značajno povećati. Napon zavarivanja može se povećati za bolje taljenje osnovnog materijala. Također, može se smanjiti brzina zavarivanja i jakost struje u odgovarajućem omjeru. Promjena zaštitnog plina u čisti CO₂ rezultirala bi povećanom dubinom penetracije, ali i većim rasprskavanjem.

8. ZAKLJUČAK

Primjena tehnologije zavarivanja u industriji zahtijeva kontinuirano unaprjeđivanje postojećih postupaka zavarivanja. Kod svih postupaka zavarivanja traži se veća učinkovitost postupka, niži troškovi i veće brzine zavarivanja, a da se pri tome zadrži visoka kvaliteta zavarenih spojeva. Zbog istraživanja i razvoja u području industrijske robotike i elektronike, dolazi do kontinuiranog poboljšanja mogućnosti modificiranih MAG postupka zavarivanja. Modificirani MAG postupci zavarivanja sve više zalaze u područje primjene TIG postupka zavarivanja, kao što je zavarivanje tankih limova. Moderni modificirani MAG postupci zavarivanja povećanom upravljivošću struje i napona zavarivanja svode nedostatke konvencionalnih načina prijenosa metala na minimum. Upotrebom WiseThin modificiranog MAG postupka moguće je zavarivanje tankih limova uz manji unos topline i smanjeno rasprskavanje. Također, ostvaruju se uštede u ukupnim troškovima zbog količine zaštitnog plina, naknadne obrade zavarenog spoja i smanjenog utroška energije. Integracijom industrijskih robota i modificiranih MAG postupaka eliminiraju se poteškoće poput pregorijevanja materijala i deformacije materijala kod zavarivanja tankih limova.

U eksperimentalnom dijelu rada uspoređen je robotizirani WiseThin postupak s robotiziranim konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja. Zaključuje se kako je na malim debljinama osnovnog materijala zavarivanje WiseThin postupkom produktivnije u odnosu na konvencionalni MAG postupak. Kod WiseThin postupka kontrola struje za zavarivanje omogućuje veće brzine zavarivanja s manjim rasprskavanjem materijala. Većom brzinom zavarivanja smanjuje se unos topline u osnovni materijal, a samim time i deformacija materijala. Pokazano je da WiseThin postupak karakterizira veće nadvišenje zavara i manje rasprskavanja u odnosu na konvencionalni MAG. Zavareni spojevi ostvareni na osnovnom materijalu debljina 1,5 mm i 2 mm su dobre kvalitete s većom penetracijom u odnosu na zavarene spojeve izvedene konvencionalnim MAG postupkom. Kod zavarenog spoja na debljini osnovnog materijala od 3 mm, kod WiseThin postupka uočene su greške naljepljivanja i nedovoljnog provara. Daljnja zavarivanja WiseThin postupkom trebalo bi izvesti desnom tehnikom rada za debljine materijala veće od 2 mm. Također, trebalo bi istražiti uštedu troškova zaštitnog plina koristeći CO₂ kao zaštitni plin i odraditi ispitivanja na drugim vrstama materijala. Na temelju rezultata analize, može se zaključiti da se korištenje WiseThin postupka zavarivanja u industrijskoj proizvodnji isplati zbog poboljšane produktivnosti, veće brzine zavarivanja te dobrih svojstava zavarenih spojeva uz pravilno odabrane parametre zavarivanja.

LITERATURA

- [1] *Advantages and Disadvantages of Robotic Welding*, <https://blog.thepipingmart.com/other/advantages-and-disadvantages-of-robotic-welding/>, dostupno 8.6.2024.
- [2] Galverly Jr. W. L.: *Welding Essentials (2nd Edition)*, Industrial Press, Inc., USA, 2007.
- [3] Piers, J., N.; Loureiro A.; Böllmsjo, G.: *Welding Robots Technology, System Issues and Applications*, Springer, London, 2006.
- [4] Kralj S., Kožuh Z., Andrić Š.: *Zavarivački i srodni postupci*, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja i Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje Katedra za zavarene konstrukcije, Zagreb, 2015.
- [5] Phillips D. H.: *Welding Engineering An Introduction*, John Wiley and Sons, Ltd, UK, 2016.
- [6] Grupa predavača: *Autorizirana predavanja iz IWE/EWE specijalizacije*, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 2023.
- [7] Silva E.F., Macedo Jr. J. R., Scotti A., Oliveira J.C.: *Power quality analysis of gas metal arc welding process operating under different drop transfer modes*, Renewable Energy and Power Quality Journal, 2011., 362-368.
- [8] *Metal Transfer Mode in GMAW, FCAW and SMAW Welding*, <https://www.materialwelding.com/metal-transfer-mode-in-gmaw-fcaw-smaw/>, dostupno 16.6.2024.
- [9] Bratić G., Šimić D., Laća J., Antunović M., Blažević N.: *Postupak zavarivanja MIG-MAG*, INSTITUT ZA RAZVOJ PODUZETNIŠTVA I OBRTNIŠTVA d.o.o., Šibenik, 2019.
- [10] International Organization for Standardization: *EN ISO 6947:2019 Welding and allied processes - Welding positions*, ISO, Geneva, Švicarska, 2019.
- [11] Karaga, I.: *Analiza primjene tehnike njihanja pri robotiziranom MAG zavarivanju*, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučišta u Zagrebu, Zagreb, 2015.
- [12] *Katalog proizvoda Elektroda Zagreb d.o.o. 2022*, <https://ezg.hr/https-ezg-hr-wp-content-uploads-2024-03-elektroda-zagreb-katalog-2022-hrv-compressed-1-pdf/>, dostupno 16.6.2024.

- [13] International Organization for Standardization: *EN ISO 14341 Welding consumables - Wire electrodes and weld deposits for gas shielded metal arc welding of non-alloy and fine grain steels - Classification*, ISO, Geneva, Švicarska, 2010.
- [14] *MIG/MAG postupak zavarivanja*, <https://tsi.webador.com/tois-mig-mag-postupak-zavarivanja/>, dostupno 8.7.2023.
- [15] Chaouch, S., Hasni, M., Boutaghane, A., Babes, B., Mezaache, M., Slimane, S., & Djenaihi: *MDC-Motor Control Using Arduino-Uno Board for Wire-Feed System*, International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), 2018., 1-6.
- [16] *GMAW Welding*, <https://quizlet.com/107847506/gmaw-welding-flash-cards/>, dostupno 16.6.2024.
- [17] Kemppi Oy: *WiseThin+*, Internal Document, Kemppi Oy, Lahti, Finska, 2022.
- [18] Kovačić Z., Bogdan S., Krajči V.: *Osnove robotike*, Graphis, Zagreb, 2002.
- [19] International Organization for Standardization: *ISO 8373:2012 Robots and robotic devices - Vocabulary*, ISO, Geneva, Švicarska, 2012.
- [20] Hong T.S., Ghobakhloo M., Khaksar W.: *Robotic Welding Technology*, Comprehensive Materials Processing, 2014., 77-99.
- [21] *World Robotics 2023*, https://ifr.org/img/worldrobotics/2023_WR_extended_version.pdf, dostupno 17.6.2024
- [22] Schilling R. J.: *Fundamentals of Robotics: Analysis and Control*, Prentice-Hall of India, New Delhi, India, 2003.
- [23] Švaco M.: *Autorizirana predavanja iz kolegija Projektiranje automatskih montažnih sustava*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2021.
- [24] Todd D. J.: *Fundamentals of Robot Technology: An Introduction to Industrial Robots, Teleoperators and Robot Vehicles*, Kogan Page Ltd, London, UK, 1986.
- [25] *Robots cartesianos*, <https://www.ams-latam.com/es/robots-cartesianos/>, dostupno 28.6.2024.
- [26] *Almega AX series Instruction manual Basic operations*, OTC DAIHEN EUROPE GmbH.
- [27] *Collaborative robot lends a helping hand*, <https://packagingscotland.com/2016/09/collaborative-robot-lends-a-helping-hand/cotland>, dostupno 17.6.2024.

- [28] *Roboguide softver za offline programiranje robota*, <https://www.virs.si/hr/laserski-sustavi-za-pracenje-i-softverske-aplikacije/roboguide/?mp=softverske-aplikacije>, dostupno 17.6.2024.
- [29] Karaga I.: *Analiza primjene tehnike njihanja pri robotiziranom MAG zavarivanju*, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [30] *Fanuc Arc Mate 100iD welding robot*, <https://metalworks.stepproject.ro/technology/fanuc-arc-mate-100id-welding-robot>, dostupno 17.6.2024.
- [31] *FANUC Robot ARC Mate 100iD Mechanical unit OPERATOR'S MANUAL*, FANUC, Japan, 2018.
- [32] *Robot controller and connectivity*, <https://www.fanuc.eu/pl/en/robots/accessories/robot-controller-and-connectivity>, dostupno 17.6.2024.
- [33] *A7 MIG Welder*, <https://www.kemppi.com/en-US/offering/family/a7-mig-welder/>, dostupno 8.7.2023.
- [34] *TCS Compact Nozzle Cleaning Station*, <https://www.binzel-abicor.com/US/eng/products/robotic-systems/torch-maintenance-reamers/torch-cleaning-station-tcs-compact/>, dostupno 17.6.2024.
- [35] *Positioners*, <https://www.fanuc.eu/bg/en/robots/accessories/robot-motion/positioners>, dostupno 18.6.2024.
- [36] *FANUC 2-axis servopositioner Mechanical unit OPERATOR'S MANUAL*, FANUC, Japan, 2018.
- [37] *Kemppi A7 MIG Welder Integration Guide*, Kemppi Oy, Finska, 2021.
- [38] European Committee for Standardization: *EN 10025-2 Standard Specification for Hot Rolled Products of Structural Steels - Part 2: Technical Delivery Conditions for Non-Alloy Structural Steels*, CEN, Brussels, Belgium, 2004.
- [39] *Abrafil 1*, <https://www.abracor.com/en/products?product=8be153b9-6527-4a28-90c6-62d8c5b981d5>, dostupno 22.6.2024.
- [40] International Organization for Standardization: *ISO 23277:2015 Standard Test Method for Non-Destructive Testing of Welds - Penetrant Testing of Welds - Acceptance Levels*, ISO, Geneva, Switzerland, 2015.
- [41] Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN EN ISO 6520-1:2007 Standard Classification of Geometric Imperfections in Metallic Materials - Part 1: Fusion Welding*, DIN, Berlin, Germany, 2007.